

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. David Russ



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

METODY ANALÝZY VIBRAČNÍCH SIGNÁLŮ

METHODS OF ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

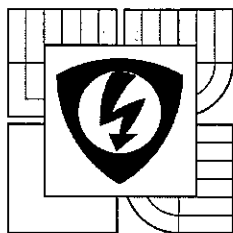
Bc. David Russ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. David Russ

Ročník: 2

ID: 146091

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Metody analýzy vibračních signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s metodami analýzy vibračních signálů.
2. V prostředí Labview vytvořte virtuální přístroj pro měření a analýzu vibrací
3. Proveďte měření vibrací na několika elektrických strojích.
3. Naměřené průběhy vyhodnoťte pomocí vytvořeného prostředí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


- [1] JACEK F. GIERAS, Jacek F.Chong Wang. Noise of Polyphase Electric Motors. Hoboken: CRC Press, 2005. ISBN 978-142-0027-730.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

Termín zadání: 21. 9. 2015

Termín odevzdání: 24. 5. 2016

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:


Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této práce jsou metody analýz vibrací v elektrických strojích. Aby bylo možné pochopit základní principy daných diagnostických metod, je nutné nejprve pochopit, jakou příčinnou vůbec vibrace vznikají a jaké jsou jejich důsledky. Z praktického hlediska byly vybrány jednotlivé metody analýz a na měřeních ověřeny. Zpracování naměřených dat bylo prováděno v prostředí programu LabVIEW. V práci jsou vytvořeny konkrétní programy, pro úplnou vibrační diagnostiku elektrických strojů, zejména pak asynchronních motorů. Charakteristickými hodnoceními vibrací jsou efektivní hodnota, Crest faktor, časový průběh a frekvenční spektrum. Výsledky této práce umožňují přiblížit, jak rychle a efektivně vyhodnotit vibrace v elektrickém stroji.

Abstract

The main target of this master's thesis is to focus on methods of analysis of vibration signals in electric machines. To get know the basic principles of the diagnostics methods, is important to clarify origin of the vibration signals and the impact they have. The selected methods were tested practically by measurement on electric machines. Measured data were processed in program LabVIEW. In this thesis were created programs which actually can be applied for complete vibrodiagnostics of electric machines in particular induction motors. The basic evaluation of vibration are the RMS value, Crest factor, time course and power spectrum. Results of this thesis are used to demonstrate how quickly and effectively can be vibration signals from electric machines evaluated.

Klíčová slova

Vibrodiagnostika; vibrace; výchylka; rychlost; zrychlení; asynchronní motor; Fourierova transformace; FFT; LabVIEW, DAQ, VIBXpert

Keywords

Vibrodiagnostics; vibration; deflection; speed; acceleration; induction motor; Fourier transformation; FFT; LabVIEW, DAQ, VIBXpert

Bibliografická citace

RUSS, D. *Metody analýzy vibračních signálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Metody analýzy vibračních signálů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

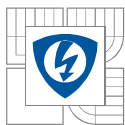
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora

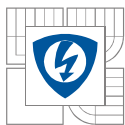


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	5
SEZNAM TABULEK.....	6
SEZNAM GRAFŮ	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
1 ÚVOD.....	10
2 VIBRODIAGNOSTIKA.....	11
2.1 DRUHY PŮSOBÍCÍ SÍLY.....	11
2.2 DEFINICE A PARAMETRY KMITAVÉHO POHYBU.....	14
2.2.1 VÝCHYLKA	14
2.2.2 RYCHLOST VIBRACÍ.....	15
2.2.3 ZRYCHLENÍ VIBRACÍ	15
2.3 ZDROJE HLUKU A VIBRACÍ.....	15
2.3.1 ELEKTROMAGNETICKÉ	16
2.3.2 MECHANICKÉ	17
2.3.3 AERODYNAMICKÉ	18
2.4 BĚŽNÉ ZÁVADY ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	19
2.4.1 NEVYVÁŽENOST ROTORU	19
2.4.2 NESOUOSOSTI	20
2.4.3 EXCENTRICKÝ ROTOR	21
2.4.4 OHNUTÝ HŘÍDEL	22
3 MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ V ELEKTRICKÉM STROJI.....	23
3.1 SNÍMAČE VÝCHYLKY, ZRYCHLENÍ A RYCHLOSTI	24
3.2 ANALÝZA SIGNÁLU V ČASOVÉ OBLASTI.....	27
3.3 ANALÝZA SIGNÁLU VE FREKVENČNÍ OBLASTI.....	29
3.4 KMITOČTOVÉ FILTRY	34
4 LABVIEW.....	36
4.1 PROGRAM PRO MĚŘENÍ S VIBXPERT II	37
4.2 PROGRAM PRO MĚŘENÍ S DAQ ASISTENTEM	39
5 MĚŘENÍ A ANALÝZA NA DANÉM STROJI	40
5.1 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	40
5.1.1 MĚŘENÍ PROSTŘEDNICTVÍM VIBXPERTU II	45
5.1.2 MĚŘENÍ PROSTŘEDNICTVÍM DAQ ASISTENTU.....	56
6 ZÁVĚR.....	63
LITERATURA	65

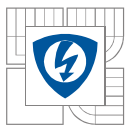
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Harmonický průběh vibrací a jeho spektrum [5].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Periodický průběh složený z více harmonických, spektrum signálu [5].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3: Průběh kmitání s buzením silou s náhodným průběhem, spektrum signálu [5]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 4: Přechodový jev s postupným tlumením, spektrum s klesající amplitudou [5]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5: Parametry popisující průběh kmitavého pohybu [7]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 6: Průběhy harmonického pohybu.: a) výchylka, b) rychlost, (c) zrychlení [4]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 7: Zdroje a způsoby šíření hluku v elektrickém stroji [6].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 8: Statická nevyváženost [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 9: Momentová nevyváženost [2].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 10: Dynamická nevyváženost [2]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 11: Paralelní a úhlová nesoosost [8]</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 12: Excentricity rotoru: a) vycentrovaný rotor, b) statická, c) dynamická [8]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 13: Prohnutý a převislý hřídel [8].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 14: Absolutní a relativní kmitání [7].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 15: Schématický obrázek znázorňující princip funkce snímače výchylky [5].....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 16: Principiální systém elektrodynamického snímače rychlosti vibrací [7].....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 17: Konstrukční provedení piezoelektrických akcelerometrů: a) Delta Shear, b) Planar Shear, c) s centrálním tlakovým namáháním (B – těleso snímače, m – seizmická hmota, P – piezoel. prvek, R – předpínací prstenec, S – předpínací disk [7].....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 18: Měření orbity rotujícího hřídele (s1, s2 – složky výchylky snímačů S1, S2, K – kinematická dráha hřídele) [7].....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 19: Význam činitele výkmitu K_V ve vibrační diagnostice [7]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 20: Příklady signálů v časové, frekvenční oblasti a jejich transformace: a) spojitý neperiodický signál – FFT, b) spojitý periodický signál – FŘ, c) nespojitý neperiodický signál – DTFT, d) nespojitý periodický signál – DFT [2].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 21: Význam váhových oken při periodickém a neperiodickém signálu [2]</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 22: Porovnání modulových charakteristik filtru DP pro jednotlivé typy aproximací [10]</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 23: Program v LabVIEW – Block panel</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 24: Program v LabVIEW – Front panel, časový průběh.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 25: Program v LabVIEW – Front panel, frekvenční spektrum s aplikací Hanningova okna</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 26: Program v LabVIEW – Front panel, frekvenční spektrum</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 27: Vytvořený program v LabVIEW s DAQ asistentem – Block diagram.....</i>	<i>42</i>



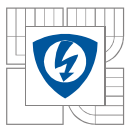
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Štítek motorů TM90-4S B3 1,2,3,4</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 2: Definované poruchy na asynchronních strojích – Motor 1,2,3,4 [3]</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 3: Hodnocení vibrací na základě mezních hodnot kmitání ČSN EN 60034-14 [14]</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 4: Parametry ložiska SKF 60206 - 2Z.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 5: Tabulka vypočtených hodnot frekvencí běžných ložiskových závad</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 6: Tabulka vypočtených hodnot frekvencí pro statickou excentricitu.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 7: Tabulka vypočtených hodnot frekvencí pro dynamickou excentricitu</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 8: VIBXpert II naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 1, 2.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 9: VIBXpert II naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 3, 4.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 10: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 1, kanál A..</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 11: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 2, kanál A..</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 12: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 1, kanál B..</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 13: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 2, kanál B..</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 14: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 3, kanál A..</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 15: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 4, kanál A..</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 16: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 3, kanál B..</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 17: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 4, kanál B..</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 18: Kalibrační data akcelerometrů.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 19: DAQ naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 1, 2</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 20: DAQ naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 3, 4</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 21: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 1, kanál A.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 22: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 2, kanál A.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 23: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 1, kanál B.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 24: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 2, kanál B.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 25: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 3, kanál A.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 26: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 4, kanál A.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 27: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 3, kanál B.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 28: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 4, kanál B.....</i>	<i>67</i>



SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Motor 1, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru</i>	<i>49</i>
<i>Graf 2: Motor 2, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru</i>	<i>49</i>
<i>Graf 3: Motor 1, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru.....</i>	<i>50</i>
<i>Graf 4: Motor 2, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 5: Motor 3, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru</i>	<i>52</i>
<i>Graf 6: Motor 4, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru</i>	<i>53</i>
<i>Graf 7: Motor 3, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 8: Motor 4, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 9: Motor 1,2 kanál A - Průběh tří period rychlosti vibrací v radiálním směru.....</i>	<i>55</i>
<i>Graf 10: Motor 1,2 kanál B - Průběh tří period rychlosti vibrací v axiálním směru.....</i>	<i>55</i>
<i>Graf 11: Motor 3,4 kanál A - Průběh tří period rychlosti vibrací v radiálním směru.....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 12: Motor 3, 4 kanál B - Průběh tří period rychlosti vibrací v axiálním směru.....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 13: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál A (radiální směr).....</i>	<i>57</i>
<i>Graf 14: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál B (axiální směr)</i>	<i>58</i>
<i>Graf 15: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál A (radiální směr).....</i>	<i>59</i>
<i>Graf 16: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál B (axiální směr))</i>	<i>60</i>
<i>Graf 17: Motor 1,2 kanál A - Průběh dvou period zrychlení vibrací v radiálním směru – DAQ..</i>	<i>62</i>
<i>Graf 18: Motor 1,2 kanál B - Průběh dvou period zrychlení vibrací v axiálním směru – DAQ</i>	<i>62</i>
<i>Graf 19: Motor 3,4 kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru – DAQ</i>	<i>63</i>
<i>Graf 20: Motor 3,4 kanál A - Průběh dvou period zrychlení vibrací v radiálním směru – DAQ..</i>	<i>63</i>
<i>Graf 21: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál A (radiální směr)</i>	<i>64</i>
<i>Graf 22: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál B (axiální směr).....</i>	<i>65</i>
<i>Graf 23: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál A (radiální směr)</i>	<i>66</i>
<i>Graf 24: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál B (axiální směr).....</i>	<i>67</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
ω	kruhová frekvence budící síly	[rad/s]
t	čas	[s]
T	perioda signálu	[s]
φ_F	počáteční fáze budící síly	[-]
φ	fázový posuv	[°]
X	amplituda	[-]
X_v	špičková hodnota	[-]
X_s	střední hodnota	[-]
X_{ef}	efektivní hodnota	[-]
X_r	rozkmít	[-]
f	frekvence	[Hz]
v	rychlost vibrací	[mm.s ⁻¹]
a	zrychlení vibrací	[m.s ⁻²]
s	výchylka vibrací	[μm]
B_{m1}	amplituda magnetické indukce ve statoru	[T]
B_{m2}	amplituda magnetické indukce v rotoru	[T]
B	celková velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře	[T]
ω_1	úhlová frekvence magnetického pole statoru	[rad/s]
ω_2	úhlová frekvence magnetického pole rotoru	[rad/s]
k, l	proměnné ($k, l = 1, 2, 3, \dots$)	[-]
m	hmotnost seizmické hmoty	[g]
M	hmotnost objektu	[kg]
k	tuhost pružiny	[N/m]
b	součinitel tlumení	[s]



U	elektromotorické napětí	[V]
l	délka vodiče cívky	[m]
U_{rms}	efektivní hodnota napětí	[V]
I_{rms}	efektivní hodnota proudu	[A]
P	činný výkon	[W]
S	zdánlivý výkon	[kVA]
$\cos \varphi$	účinník	[-]
I_{sp}	špičkový hodnota proudu	[A]
CF	Crest faktor	[-]
h	výška osy motoru	[mm]
i	řád harmonické	[-]
Q_R	počet drážek rotoru	[-]
s	skluz	[-]
p	počet pólových dvojic	[-]
n_l	synchronní otáčky	[min ⁻¹]

1 ÚVOD

Točivé elektrické stroje dnes patří do největší skupiny elektrických zařízení, užívané v různých průmyslových odvětvích. Spolu s tím rostou i nároky na provoz, účinnost a životnost daného zařízení. Důsledky přerušení výrobního provozu mohou mít až fatální následky, zejména po finanční a bezpečnostní stránce. Proto základním faktorem jsou vysoké požadavky na spolehlivý provoz elektrických strojů. Točivé stroje jsou zpravidla kontrolovány periodicky, aby se předcházelo výpadkům ve výrobě či dlouhodobým odstávkám.

Mezi prediktivní metody údržby strojních zařízení patří vibrodiagnostika. Jedná se o nedestruktivní diagnostiku rotačních strojních zařízení. Princip analýzy je založen na bezdemontážním měření daného stroje, ve kterém jsou generovány vibrace, které podávají informaci o stavu zařízení. Měření rotujících strojů, monitorování stavu ložisek a dynamických stavů jako nesouosost, nevyváženost, excentricita rotoru apod., jsou objektem vyhodnocení stavu strojů. K vyhodnocení slouží metody analýz vibračního signálu v časové a frekvenční oblasti nevyjímaje.

Cílem diplomové práce bude objasnit fyzikální popis vibrací, vznikajících v elektrickém stroji. Budou uvedeny zdroje původu mechanického kmitání uvnitř i vně stroje. Základní veličiny sloužící pro popis a hodnocení velikosti vibrací. Spolu se vznikem vibrací jsou úzce spjaty jejich důsledky vedoucí k běžným závadám. Tyto závady se projevují svojí velikostí a charakterem v naměřených závislostech. Měření vibrací je prováděno pomocí odlišných typů snímačů, které je nutné brát v potaz. Naměřená data se dále musí analyzovat, k čemuž slouží několik metod, v časové a frekvenční oblasti. Zaměřeno bude na použití programu LabVIEW při zpracování naměřených dat.

Získané teoretické informace budou převedeny do praxe prostřednictvím měření na asynchronních strojích. Měření bude provedeno s průmyslovým zařízením VIBXpert II a s laboratorní technikou od firmy National Instruments. Pro obě měření bude odladěn program pro analýzu naměřených signálů. Hodnocení vibrací dle několika metod bude objasněno a náležitě okomentováno.

2 VIBRODIAGNOSTIKA

K zajištění spolehlivé funkce a dlouhodobého bezporuchového provozu každého elektrického stroje je potřeba jej náležitě udržovat. Největší část „provozního života“ se technické zařízení nachází v provozu. Příkladem může být provozní doba u větších strojů, jako jsou například turbogenerátory. Doba provozu dosahuje řádově 25 i více let. Během této doby se provádí kontroly, údržby, aby se předcházelo vzniku poruch, jejichž důsledky mohou vést k přerušení provozu či úplnému odstavení stroje. Diagnostika se neprovádí pouze z hlediska životnosti, provozuschopnosti stroje, avšak i z hlediska efektivity, spolehlivosti a bezpečnosti. Dosáhnutí stavu blížíícího se ideálnímu – bezporuchovému, je složitá záležitost jednak z hlediska funkčnosti a spolehlivosti, jež ovlivňuje mnoho faktorů. Představme si třeba výše zmíněný turbogenerátor pracující ve výrobní hale průmyslového podniku. V takovém prostředí provoz generátoru negativně ovlivňují jisté okolnosti (prach, vlhkost, teplota, nedostatečná kvalita napájecí sítě, ...). Proto podstata diagnostiky spočívá v analýze a vyhodnocení odezvy na poruchový stav. U malých strojů se údržby neprovádí, avšak pracují až do poruchy. Následně se provede výměna kus za kus a výhodou jsou nižší náklady než při pravidelných údržbách. U dražších zařízení se provádějí periodické prohlídky nebo revize. Zde se jedná o preventivní údržbu s případným odstraněním poruchy. Abychom se mohli zaměřit na analýzu vibrací vznikajících v elektrickém stroji, je nejprve nutné pochopit co je zdrojem vibrací, jejich fyzikální popis a parametry popisující vlastnosti vibrací. [1]

2.1 Druhy působící síly

Vibrodiagnostika spočívá v analýze signálu, který je odezvou (vibrací) na vzniklé příčiny. Tyto příčiny jsou podstatné při volbě způsobu jejich odstranění. Charakter vibrací je závislý na druhu zdrojové síly. Mezi základní typy budících sil patří:

- periodická budící síla
- impulsní budící síla
- budící síla náhodného průběhu

Periodická budící síla

Základním typem periodické budící síly je síla harmonická. Harmonické síly ideálně kopírují průběh goniometrických funkcí sinus a kosinu. Síly působící v rotačních strojích vyjadřujeme jejich součtem, výsledné spektrum naměřeného signálu se skládá ze základní harmonické a vyšších harmonických složek. Vyšší harmonické mohou být liché a sudé. Harmonické frekvenční složky jsou definované amplitudou nebo efektivní hodnotou, která má pevný matematický vztah vzhledem k amplitudě. Dále jsou definovány základní síťovou frekvencí a počáteční fází. Máme-li těleso umístěné na pružině, na kterou působí harmonická síla:

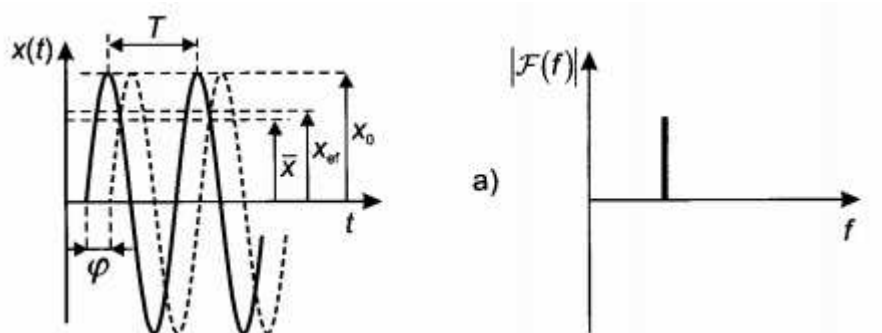
$$f(t) = F \cdot \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (1)$$

je jeho ustálený pohyb rovněž harmonický se stejnou kruhovou frekvencí ω , ale s odlišnou amplitudou F . Tento pohyb je nazýván kmitáním a v případě periodické budící síly se jedná o vynucené kmitání. [2]

Příkladným zdrojem periodické budící síly a odezvy ve formě vibrací jsou např. nevyváženosti rotoru, excentricity, závady na ložiscích a další. Výchylka kmitavého pohybu potom je:

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi_F - \varphi) \quad (2)$$

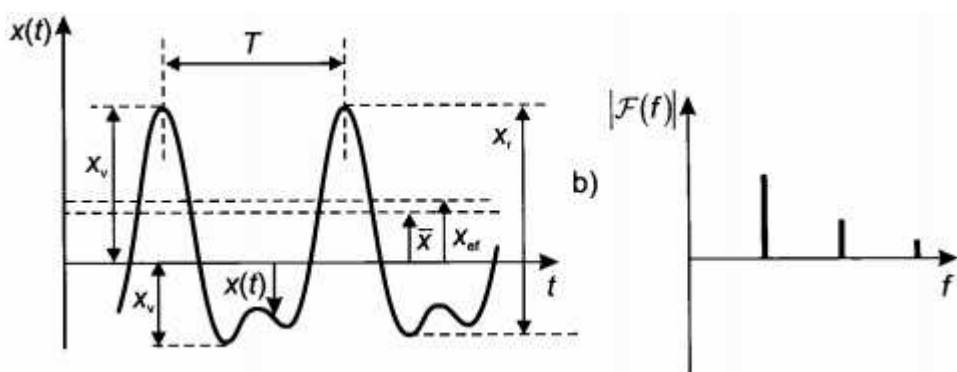
kde	X	amplituda kmitání
	ω	kruhová frekvence budící síly [rad/s]
	t	čas [s]
	φ_F	počáteční fáze budící síly
	φ	fázový posuv (zpoždění výchylky za budící silou)



Obrázek 1: Harmonický průběh vibrací a jeho spektrum [5]

Impulsní budící síla

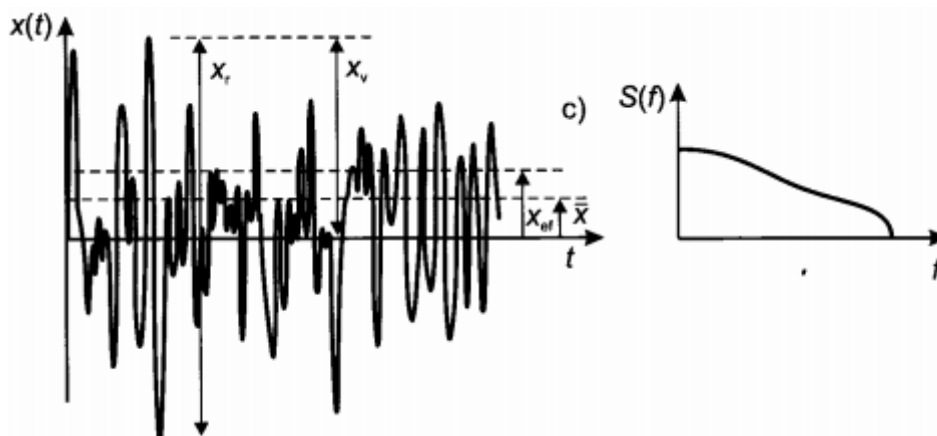
Další typem zdroje vedoucí ke vzniku mechanických vibrací je impulsní nebo také rázová síla. Střetnutím dvou navzájem se pohybujících těles, dochází ke změně veličin určující vibrace. Ráz způsobí vychýlení z rovnovážné polohy. Těleso poté volně kmitá a generuje se v něm postupná rázová vlna. Oproti periodické síle může dojít ke kmitání, kdy výsledný průběh obsahuje spolu se základní frekvencí i vyšší harmonické. Typickým příkladem je pohyb poškozené části stroje (kulička v ložisku apod.). V praxi se používá uměle generovaného impulsu, např. diagnostickým kladivem se senzorem síly. Periodický složený průběh můžeme vidět na obrázku: [2] [5]



Obrázek 2: Periodický průběh složený z více harmonických, spektrum signálu [5]

Budící síla s náhodným průběhem

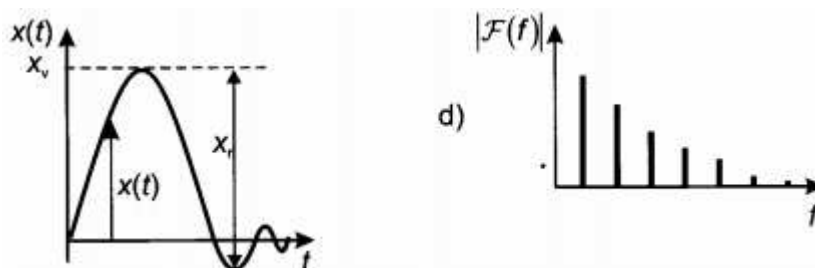
V případě náhodného buzení musí být brán zřetel na to, že přítomnost náhodného buzení je v každém případě působení na dané těleso. Ve většině případů se však jedná pouze o šum. Odezva na působení náhodné budící síly je v podobě náhodného průběhu. Základní hodnoty těchto neperiodických vibrací se s časem mění a spektrum pak obsahuje všechny frekvence od nuly do maxima. V některých praktických případech je nutné uvážit jejich působení, zejména při standartní vibrodiagnostice. Příkladem může být přítomnost turbulentního proudění, které může být nežádoucí.



Obrázek 3: Průběh kmitání s buzením silou s náhodným průběhem, spektrum signálu [5]

Samobuzené kmitání

Přítomnost samobuzeného kmitání je v případech, kdy na objekt působí vzduch nebo kapalina. Dojde tak k vzájemnému působení mezi kmitáním objektu a aerodynamickými silami. Účinky aerodynamických sil vyvolají kladnou odezvu od kmitání objektu na vlastní frekvenci. Důsledkem je zvýšení amplitudy kmitání a zvýšení kmitavého pohybu vlivem těchto sil. Pohyb, který vybudí aerodynamické síly, se obecně nazývá třepetáním. Dojde ke kmitání objektu na jedné z vlastních frekvencí. Potenciálně se jedná o velmi destruktivní přechodový jev. [2] [5]



Obrázek 4: Přechodový jev s postupným tlumením, spektrum s klesající amplitudou [5]

2.2 Definice a parametry kmitavého pohybu

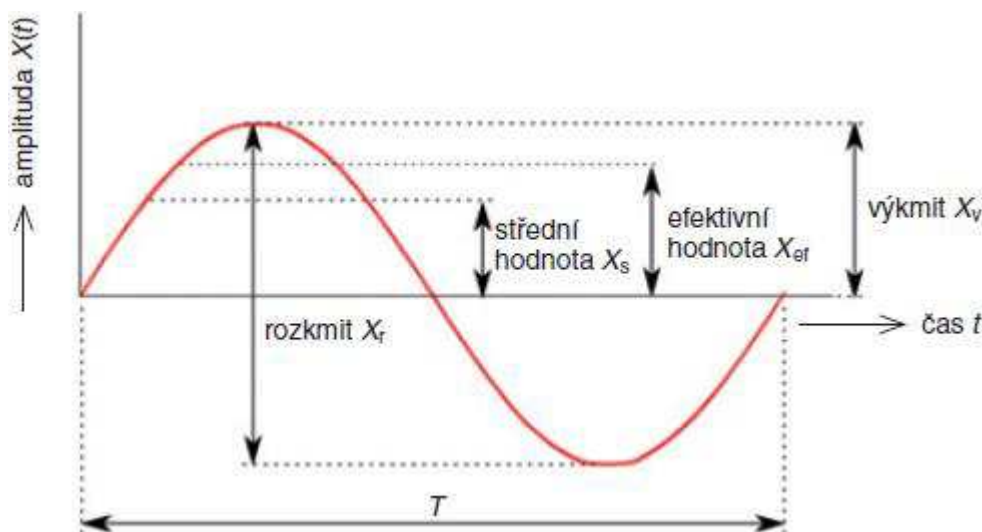
Vibraci v elektrickém stroji definujeme jako mechanické kmitání a chvění prostředí. S vibracemi je úzce spojen hluk. Mechanické kmitání popisujeme jako dynamický jev, při kterém tělesa nebo hmotné body vykonávají vratný pohyb kolem klidové polohy. Klidová rovnovážná poloha je definována nulovým působením budících sil. Vznik kmitání tělesa je tedy podmíněn působením budící síly. Budící síly mohou být jak externí tak interní (tzn. budící síla působící uvnitř nebo vně tělesa). Vlastnosti mechanických veličin vibrací určuje budící síla, její směr a frekvence. Vibrace dále popisujeme amplitudou a fází v konkrétním časovém okamžiku. [1]

2.2.1 Výchylka

Při rozboru harmonického kmitání stačí určit pouze jednu z veličin popisující vlastnosti daného pohybu. Jednou z nich je výchylka x_m nebo také výkmit x_v , nutno dodat, že se jedná o stejné veličiny. Z obrázku 5 vidíme, že se jedná o amplitudu vibrací, tj. maximální hodnotu harmonických vibrací v obou směrech od počátku. Jednotkou je μm . V praxi se využívá při popisu změn polohy kmitajících objektů při pomalých dějích.

Základní rovnice 1 popisující jednoduchý harmonický pohyb neboli harmonické vibrace s určitou frekvencí udává základní vlastnosti mechanického kmitání. Harmonické vibrace jsou určeny veličinami, jako jsou výchylka, rychlost a zrychlení.

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$



Obrázek 5: Parametry popisující průběh kmitavého pohybu [7]

Amplituda $X(t)$ je okamžitá hodnota zobrazeného signálu v čase t . Výkmit (peak – špičková hodnota) X_v je maximální vzdálenost vrcholu vlny od referenční hodnoty. Rozkmit X_r (peak to peak, špička – špička) je maximální vzdálenost protilehlých vrcholů vlny. Střední (average – průměrná) hodnota X_s je průměrná hodnota amplitudy v dané periodě. Efektivní hodnota X_{ef} (rms – root means square) je objektivní hodnota užívaná v diagnostických předpisech.

Dalším parametrem popisujícím kmitavý pohyb je frekvence kmitání. Frekvence udává počet kmitů dokončených v průběhu každé vteřiny. Frekvenci značíme f a jednotkou v soustavě SI je Hz. Veličina ω je úhlová rychlost (frekvence) pohybu, jednotkou je rad/s . [4]

$$f = \frac{\omega}{2\pi}; T = \frac{1}{f} \quad (4)$$

S frekvencí je spojena perioda signálu T , jejíž jednotkou je s . Udává dobu, za kterou se uskuteční jeden úplný kmit. Pohyb opakující se v pravidelných intervalech se pak nazývá pohybem periodickým. Fáze pohybu ($\omega t + \varphi$) je časově závislá a konstanta φ je počáteční fáze dána posunem dvou periodických veličin. Hodnota počáteční fáze závisí na výchylce a rychlosti tělesa v čase $t = 0$.

2.2.2 Rychlost vibrací

Rychlost je obecně definována jako derivace dráhy podle času. V případě harmonického kmitání je rychlost vyjádřena derivací okamžité výchylky a souvisí s kinetickou energií kmitajícího tělesa. Jednotkou rychlosti vibrací je m/s . Rychlost dobře charakterizuje energetické poměry mechanického kmitání. Názorným příkladem může být popis vlastností vibrací u elektrických strojů.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} x_m \cos(\omega t + \varphi) = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Amplitudou rychlosti je z rovnice 5 výraz ωx_m . Na obrázku 2 dále vidíme průběh a změnu rychlosti vibrací v závislosti na okamžité výchylce. Můžeme vidět, že průběh rychlosti $v(t)$ je fázově posunut o čtvrtinu periody vzhledem ke křivce $x(t)$. Je patrné, že při největší výchylce $x(t) = x_m$ je velikost rychlosti nejmenší tj. nulová. Naopak v okamžiku nejmenší výchylky je rychlost největší.

2.2.3 Zrychlení vibrací

Zrychlení vibrací dostaneme derivací rychlosti podle času. Zrychlení souvisí se setrvačnými účinky kmitajícího tělesa. Jednotka zrychlení se uvádí v násobcích gravitačního zrychlení $g = 9,81 m \cdot s^{-1}$. [4]

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} (-\omega x_m \sin(\omega t + \varphi)) \quad (6)$$

možné psát jako:

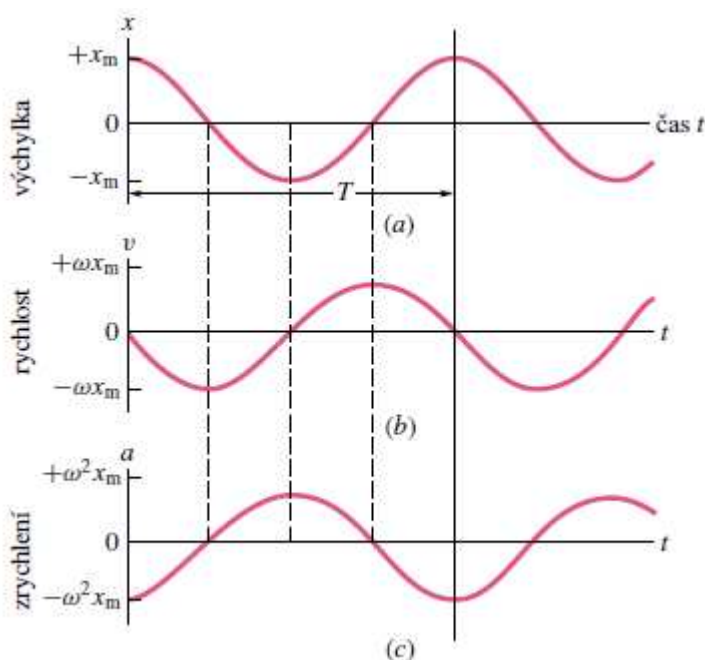
$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi) \cong -\omega^2 x(t)$$

Z obrázku 6 vidíme, že se hodnota zrychlení mění v rozmezí $\pm \omega^2 x_m$. Průběh zrychlení $a(t)$ je posunut o čtvrtinu periody, vzhledem k průběhu rychlosti $v(t)$. Zrychlení tělesa je úměrné výchylce s opačným znaménkem a druhé mocnině konstanty úhlové rychlosti ω . [4]

2.3 Zdroje hluku a vibrací

Hluk je důsledkem mechanického kmitání šířícího se prostředím s určitou rychlostí. Mechanický zvuk z fyzikálního hlediska reprezentuje vlna šířící se v tomto pružném prostředí. Frekvenční rozsah hluku slyšitelného pro člověka je v rozmezí 20 Hz do 20 kHz. Zvuk se šíří všemi směry od zdroje přenosem energie ve formě akustických vln. Akustické vlny dělíme dle frekvenčního rozsahu:

- | | |
|---------------------|-------------------|
| - Infrazvuk | až do 20 Hz |
| - Nízké frekvence | od 20 Hz do 40 Hz |
| - Radiové frekvence | 8 kHz až 16 kHz |
| - Ultrazvuk | 20 kHz a více |



Obrázek 6: Průběhy harmonického pohybu.: a) výchylka, b) rychlost, (c) zrychlení [4]

Na základě časového průběhu dělíme zvukové vlny na ustálené, proměnné, přerušované a pulsy. Z hlediska analýzy indukčních motorů (asynchronních) jsou zajímavé zvukové signály s frekvencí nad 1 kHz. Rychlé změny zvuku v prostoru jsou charakterem hluku elektrických strojů. Tyto změny jsou nejčastěji způsobeny vibracemi strojních součástí, jejich povrchem nebo aerodynamickými jevy vedoucími k proudění ventilačního vzduchu v blízkosti stroje. Pro indukční motory lze základní zdroje hluku rozdělit na tři kategorie: [6]

- elektromagnetické
- mechanické
- aerodynamické

Nejtypičtějším zdrojem hluku v elektrických strojích jsou zdroje elektromagnetické. Dochází k vibraci konstrukce stroje nebo jiných částí, které pracují na principu těchto sil. Frekvenční spektrum takového vibračního signálu má diskrétní charakter, tzn., že nemá spojitý průběh. Z tohoto průběhu lze podle jednotlivých harmonických složek zjistit, která část stroje vykazuje známky poškození.

2.3.1 Elektromagnetické

Z hlediska působení elektromagnetického pole je zásadní magnetická indukce ve vzduchové mezeře. Vliv magnetické indukce ve vzduchové mezeře vede ke vzniku magnetických sil, s různým směrem působením. Také tyto síly mohou mít rozdílnou velikost amplitudy, frekvence a jejich účinky jsou rozděleny mezi stator a rotor stroje. Charakteristiky těchto sil závisí na mnoha faktorech, zejména však na tvaru a velikosti vzduchové mezery. Lze zde podotknout, že pro spolehlivé funkční předpoklady u indukčních strojů musí být délka vzduchové mezery optimálně navržena. Řádově se jedná o desetiny milimetrů a velikost magnetické indukce v mezeře se pohybuje v rozmezí 0,5 - 0,6 T. [11]

Hlavním zdrojem hluku je samotná konstrukce rotoru. V případě, že frekvence otáčení rotoru je blízká radiální síle nebo se rovná frekvenci otáčení statoru, dochází k rezonanci

a deformaci statorového systému vibracemi a hlukem. Dochází k magnetostrickci tj. jevu, kdy těleso z feromagnetického materiálu v magnetickém poli změní svoje rozměry.

Hluk magnetostrickce můžeme zanedbat ve většině případů s nízkou a vysokou frekvencí $2f$, uspořádání radiálních sil je $r = 2p$, kde f je základní frekvence a $2p$ je počet pólových dvojic. Nicméně radiální síly vlivem magnetostrickce mohou dosáhnout až 50% radiálních sil, které jsou produkovány ve vzduchové mezeře magnetického pole. [6]

Magnetická indukce tvořená statorovým polem:

$$B_1 = B_{m1} \cdot \cos(\omega_1 t + k\alpha + \phi_1) \quad (7)$$

Magnetická indukce tvořená rotorovým polem:

$$B_2 = B_{m2} \cdot \cos(\omega_2 t + k\alpha + \phi_2) \quad (8)$$

Celková velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře bude:

$$B = 0,5 \cdot B_{m1} B_{m2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (k + l)\alpha + (\phi_1 + \phi_2)] + \\ + 0,5 \cdot B_{m1} B_{m2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (k - l)\alpha + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (9)$$

kde	B_{m1}	amplituda magnetické indukce ve statoru [T]
	B_{m2}	amplituda magnetické indukce v rotoru [T]
	ω_1	úhlová frekvence magnetického pole statoru [rad/s]
	ω_2	úhlová frekvence magnetického pole rotoru [rad/s]
	k, l	proměnné ($k, l = 1, 2, 3, \dots$)

Magnetický tlak s amplitudou $P_m = 0,5 B_{m1} B_{m2}$ působí v radiálním směru na statoru. Vlivem tohoto tlaku dochází na povrchu rotoru k deformacím a zejména vibracím, které jsou zdrojem hluku. Ve vzduchové mezeře se mohou objevit další harmonické frekvence, jejichž zdrojem může být špatné drážkování, rozložení vinutí v drážkách statoru a rotoru, excentricita, zkreslení vstupního proudu či fázová nesymetrie. Působením harmonických frekvencí vznikají nechtěné parazitní síly. Proto se v praxi musí přistupovat k návrhu elektrického stroje s určitými zásadami, které je nutné striktně dodržovat, aby se minimalizovalo působení elektromagnetických sil. Vhodně musíme zvolit poměr drážek statoru a rotoru, počet drážek na pól a fázi a další. [11]

2.3.2 Mechanické

Nejčastějším mechanickým zdrojem hluku u elektrických strojů jsou ložiska a jejich závady, například závady na vnějším a vnitřním kroužku. Dalšími typickými závadami mohou být: nesouosý hřídel, nevyvážený rotor, ohnutý hřídel, spojky, ozubená kola a další. K těmto postupným poškození (degradacím) dochází vlivem účinků napětového, tepelného, chemického a jiného působení vedoucí ke změnám struktury použitých materiálů. U rotoru se snažíme dosáhnout precizního vyvážení, abychom zajistili výrazné snížení vibrací. Nevyváženost rotoru je způsobena dynamickými vibracemi a excentricitou v rotoru, která nakonec vede k šíření hluku prostřednictvím statoru, rotoru i jeho podpůrných konstrukcí. U elektrických strojů jsou používány kluzná a valivá ložiska. [6]

Hluk způsobený valivými ložisky závisí na:

- přesnosti jednotlivých částí ložiska,
- mechanické rezonanční frekvenci vnějšího kroužku,
- rychlosti otáčení, mazání, okolních podmínek,
- toleranci, seřízení, zátěži, teplotě a přítomnosti cizích předmětů.

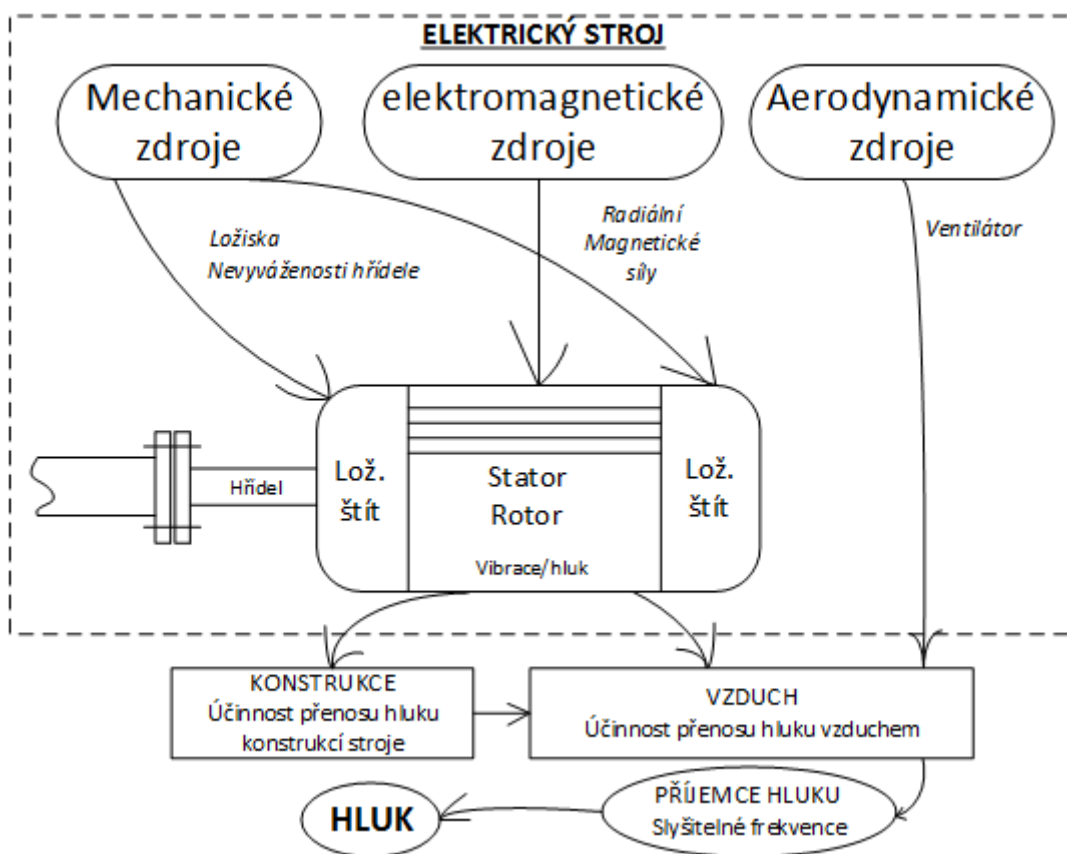
U kluzných ložisek je hluk jimi způsobený obecně nižší než u valivých ložisek. Vibrace a hluk šířící se prostřednictvím kluzných ložisek jsou závislé na:

- drsnosti kluzného povrchu,
- mazání, stabilitě a víření olejového filmu v ložisku,
- výrobním procesu,
- kvalitě a instalaci.

2.3.3 Aerodynamické

Základním zdrojem hluku v elektrickém stroji aerodynamického charakteru je ventilátor. Vytvářet hluk může jakákoliv překážka, která je vystavena proudu vzduchu. Hlavní důvod hluku ventilátoru, je vznik turbulentního proudění vzduchu kolem lopatek ventilátoru. U neuzavřených motorů je hluk vnitřního ventilátoru šířen větracími otvory, kdežto u zcela uzavřených motorů převládá hluk šířící se z vnějšího ventilátoru.

Podle spektrálního rozložení hluku uvnitř ventilátoru rozlišujeme široké pásmo hluku (100 Hz až 10 kHz) s kontinuálním (spojitým) charakterem a sirénu (tónovitý hluk). Velikost akustického výkonu roste s druhou mocninou rychlosti točení ventilátoru. Hluk sirény můžeme odstranit zvětšením vzdálenosti mezi vrtulí a stacionární (nehybnou) překážkou. [6]



Obrázek 7: Zdroje a způsoby šíření hluku v elektrickém stroji [6]

2.4 Běžné závady elektrických strojů

Vznik vibrací v elektrickém stroji ovlivňuje hned několik konstrukčních parametrů. Vliv mají zejména konstrukce součástí, jejich tvar a kvalita výroby. S přibývajícím časem používání elektrického stroje v provozním chodu, se zvyšuje možnost vzniku vibrací a opotřebení jednotlivých součástí, spolu s dynamickými vlastnostmi součástí v soustavě celého stroje. K identifikaci zdroje vibrací dochází v jejich spektru. Každému zdroji vibrací, které je známkou poškození stroje lze ve spektru dohledat příslušnou frekvenci buzení. Amplituda je úměrná stupni poškození. Každý zdroj tak způsobí frekvenční špičky (amplitudy na odpovídajících základních frekvencích), jejichž počet je obecně dán stupněm odchylky od sinusového průběhu v časovém okamžiku. S rostoucí odchylkou, roste počet frekvenčních špiček, které zdroj produkuje.

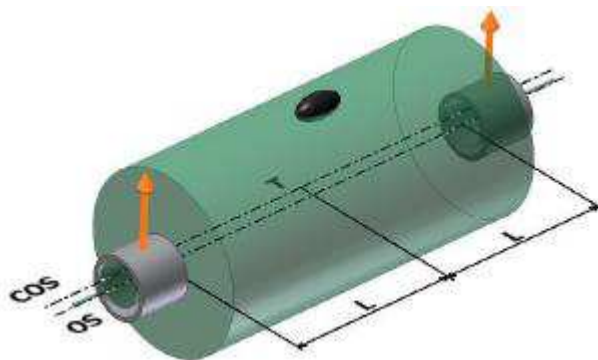
Identifikace těchto frekvencí vyskytující se v konstrukci elektrického stroje se provádí měřením a následnou analýzou. Působení dynamických sil produkuje v měřícím snímači sinusový průběh zrychlení, rychlosti nebo výchylky vibrací. [8]

2.4.1 Nevyváženost rotoru

Nevyváženost závisí na rozdělení těžiště rotoru vzhledem k jeho ose otáčení. Důsledkem nerovnoměrného rozdělení hmoty je nevyváženost, která při otáčení rotoru způsobuje vznik odstředivé síly, hluku a chvění rotoru. S vyššími otáčkami se jejich vliv stupňuje.

Statická (silová) nevyváženost

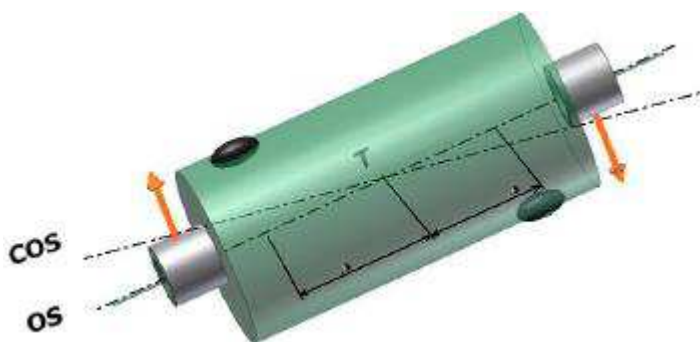
V případě silové nevyváženosti se jedná o posunuté těžiště rotoru. Její charakterem je, že se projevuje stejnou fází a má ustálený průběh. Vlivem nevyváženosti se zvyšuje amplituda vibrací se čtvercem otáčkové frekvence, pod hodnotou kritických otáček rotoru. Příkladem může být trojnásobné zvýšení frekvence, které způsobí devítinásobně vyšší vibrace. Statická nevyváženost se ve spektru vibrací projevuje výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na ložiskách. Fázový posuv je nulový nebo výrazně malý ($\pm 30^\circ$). Charakter této amplitudy je v mnoha případech dominující na základní rotorové frekvenci. Projev-li ve spektru signálu přítomnost vyšších harmonických násobků základní otáčkové frekvence, dochází ve stroji k výrazné nevyváženosti. V praxi se však tato porucha objevuje zřídka, zejména pak u rotujících kotoučů, jejichž průměr je zdaleka větší než šířka kotouče. Nevyváženost popisujeme vztahem mezi centrální osou setrvačnosti (cos) a osou rotace (os). V tomto případě je centrální osa setrvačnosti posunuta oproti ose rotace, přičemž je zachována jejich rovnoběžnost. [2] [3]



Obrázek 8: Statická nevyváženost [2]

Momentová nevyváženost

Momentová nebo také někdy označována jako dvojicová nevyváženost se projevuje zejména v situaci, kdy se rotor nachází v pohybu. Dochází k působení dvojice sil způsobujících momentové namáhání, jejichž důsledkem jsou vibrace rotoru. Osy rotace (os) a setrvačnosti (cos) jsou zde různoběžné, avšak jejich osy jsou protnuty přímo v těžišti. Stejně jako u statické se i momentová nevyváženost projevuje ve spektru s dominantní amplitudou na základní frekvenci a to v radiálním směru působící na obou ložiskách. Fázový posuv je stejný jako u statické nevyváženosti. Mezi horizontálním a vertikálním směrem je fázový rozdíl přibližně 90° s možnou odchylkou $\pm 30^\circ$. Typickou aplikací odstranění momentové nevyváženosti je použití vyvažovací závaží.



Obrázek 9: Momentová nevyváženost [2]

Dynamická nevyváženost

Třetím nejčastějším typem nevyváženosti vyskytujícím se v praxi je dynamická nevyváženost. Jedná se o kombinaci momentové a statické nevyváženosti. K protnutí os setrvačnosti a rotace zde nedochází v těžišti rotoru, ale mimo něj. Ve spektru je dominantní první harmonická, fázový rozdíl mezi vnitřním a vnějším ložiskem může být v rozmezí od 0° do 180° . Převládá-li nevyváženost je fázový rozdíl mezi horizontální a vertikální vibrací na obou ložiscích zhruba $\pm 40^\circ$.



Obrázek 10: Dynamická nevyváženost [2]

2.4.2 Nesouososti

K nesouososti může dojít v případě dvou rotorů axiálně spojených (za sebou v jednom směru), kdy jejich osy rotace nejsou totožné. Příčinou jsou mimoběžné osy rotorů před montáží. Smontováním dojde k silovému napojení hřídelí a k zakřivení osy rotace. Rozlišujeme dva typy nesouosostí a v praxi se lze setkat i s jejich kombinací:

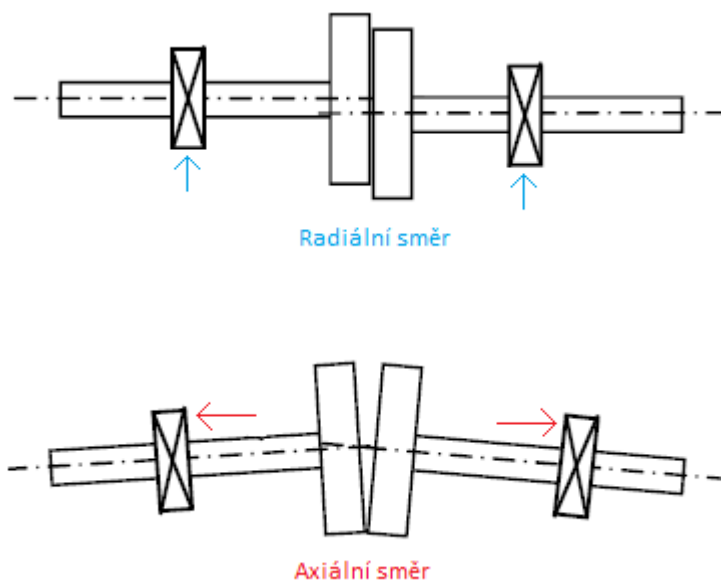
- Paralelní nesouosost

Rotační osy obou hřídelí byly před smontováním rovnoběžné (paralelní). Důsledkem je ohybové napětí v rotoru a křivka deformace tvaru S. Vibrace se projevují na ložiscích, jejich dominance je v radiálním směru a přes spojku jsou přibližně v protifázi tj. o 180° posunuty.

Druhá harmonická složka je obvykle vyšší než první harmonická a její velikost je závislá na konstrukci a typu spojky. [2] [8]

- Úhlová nesouosost

Osy rotací hřídelí jsou před montáží mimoběžné, avšak protínající se (různoběžné). V rotoru se objeví ohybové napětí a deformační křivka ve tvaru U. Při úhlové nesouososti jsou vibrace na ložiskách v radiálním i axiálním směru, kdy převládají vibrace hlavně ve směru axiálním. Opět jsou vibrace přes spojku v protifázi, typickým příkladem jsou složky první a druhé harmonické. Při výrazné úhlové nesouososti může dojít k vzniku více harmonických násobků frekvence otáčení.



Obrázek 11: Paralelní a úhlová nesouosost [8]

2.4.3 Excentrický rotor

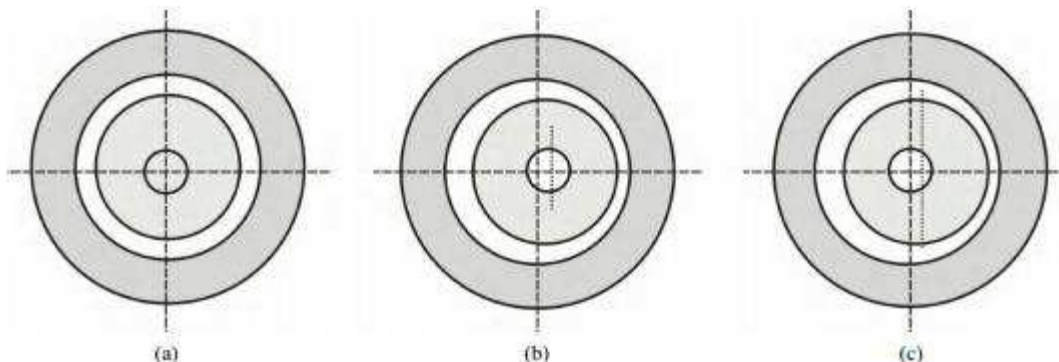
Excentricita se projevuje zejména v případech, kdy je rotační osa posunuta vzhledem k ose geometrické. Součástí převodu je ozubené kolo, řetězové kolo, řemenice, ložiska a další. Důsledkem excentrického rotoru je proměnná vzduchová mezera mezi statorem a rotorem, která vyvolává pulzující vibrace tzv. zázněje. Největších vibrací dosahuje na první harmonické složce. Skrze excentrickou součást působí do převodu periodický zdroj síly, způsobený výchylkou vibrací. I z tohoto hlediska může být excentricita zaměněna za nevyváženost. Vyvážení však nemá na odstranění excentricity vliv. Docílíme pouze snížení vibrací v kolmém směru na spojnici os, avšak vibrace ve směru spojnice os přetrvávají a mohou narůstat. Excentricita přispívá ke vzniku vibrací a hluku. Zapříčiní nevyvážený tah magnetické síly v rotoru, která ohýbá hřídel. Indukují napětí v paralelních větvích statorového vinutí, vedoucí k výskytu vyrovnávacích proudů. Dále snižují mechanickou tuhost hřídele a první kritické otáčky hřídele rotoru kvůli zvýšenému tahu magnetické síly v rotoru. [8] [3] [6]

Statická excentricita

Jeli rotor vychýlený ze středu motoru a stále se točí kolem své vlastní osy rotace, vzniká statická excentricita. Velikost vzduchové mezery není po celém jejím obvodu konstantní a to má za následek, že v místech s menší vzduchovou mezerou dochází k silnějšímu vzájemnému působení statorového a rotorového magnetického pole.

Dynamická excentricita

Ve druhém případě dochází k dynamické excentricitě, když se rotor otáčí v geometrickém středu motoru, avšak se už neotáčí kolem vlastní středové osy rotace. Vzduchová mezera je zde funkcí jak polohy, tak i času. Proměnná vzduchová mezera se otáčí s frekvencí ekvivalentní frekvenci otáčení rotoru.

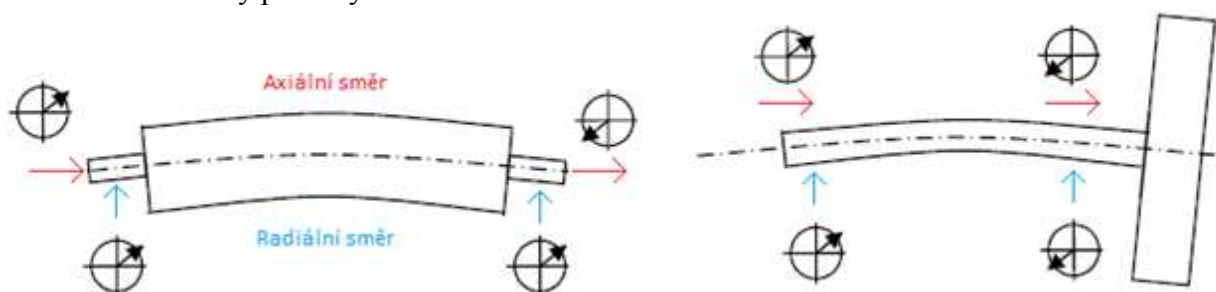


Obrázek 12: Excentricity rotoru: a) vycentrovaný rotor, b) statická, c) dynamická [8]

2.4.4 Ohnutý hřídel

Příčinou deformace hřídele je netotožnost geometrické osy spolu s osou rotace. Geometrická osa ohnutého hřídele má tvar křivky. Není-li osa rotace přímkou, jedná se o nesouosý hřídel. V případě, že neleží těžiště na rotační ose, je rotor nevyvážen. Z praxe rozeznáváme dva typy ohnutého hřídele a to:

- Prohnutý hřídel na dvou podporách
- Ohnutý přepislý hřídel

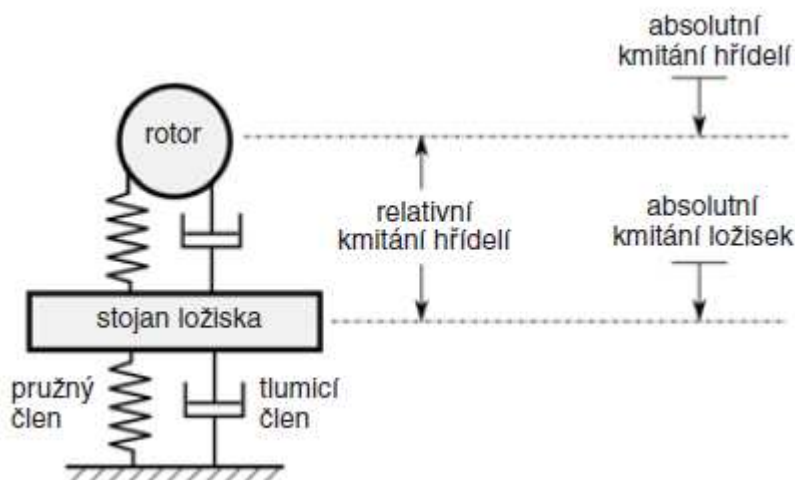


Obrázek 13: Prohnutý a přepislý hřídel [8]

Důsledkem ohnutého hřídele jsou velké axiální vibrace v protifázi (180°) na každém ložisku. Největší vibrace se projeví ve spektru, dochází-li k ohybu v půlce hřídele. Při ohybu v blízkosti spojky se projevuje druhá harmonická složka vibrací. Dalšími běžnými zdroji šíření vibrací v elektrickém stroji mohou být například mechanické uvolnění součástí, ozubené soukolí, řemenové převody, řetězové převody a ložiska. [8] [3]

3 MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ V ELEKTRICKÉM STROJI

Základním předpokladem vibrodiagnostiky jsou kvalitní a objektivní informace o měřeném systému. Míru vibrací elektrického stroje posuzujeme dle naměřených veličin, jimiž jsou frekvence kmitání a tři veličiny charakterizující kmitavý pohyb. V první fázi měření vibrací je nutno určit, zda se jedná o vibrace relativní nebo absolutní. Rozdíl mezi nimi je v popisu kmitavého pohybu. U absolutních vibrací je pohyb popsán vzhledem k zemské ose, u relativních se vztahuje k uměle vytvořené resp. vhodně zvolené základně (např. rám stroje).



Obrázek 14: Absolutní a relativní kmitání [7]

Princip snímače spočívá ve snímání pohybu seizmické hmoty s hmotností m vzhledem k měřenému objektu, který má hmotnost M . Vhodnou volbou parametrů m , b a k (12) můžeme vytvořit snímač výchylky, rychlosti nebo zrychlení. Existuje více druhů snímačů používajících se v praxi při měření vibrací v elektrických strojích. Rozdělujeme je podle měřené veličiny:

- Snímače výchylky
- Snímače rychlosti (velometry)
- Snímače zrychlení (akcelerometry)

Pro ideální stav můžeme napsat diferenciální rovnici popisující kmitání seizmické hmoty snímače:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x} \quad (10)$$

kde: F_b tlumicí síla

y výchylka,

\dot{y} rychlost

\ddot{y} zrychlení

\ddot{x} zrychlení měřeného objektu

m hmotnost seizmické hmoty

M hmotnost objektu

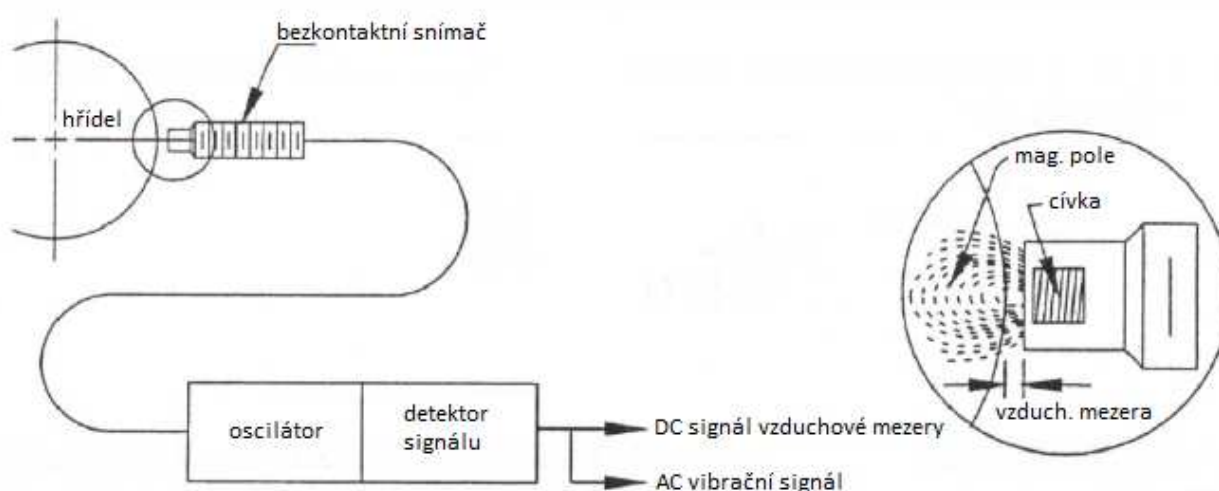
k tuhost pružiny

b součinitel tlumení

3.1 Snímače výchylky, zrychlení a rychlosti

Snímače výchylky

Snímače výchylky (polohy, posunutí) mají velkou hmotnost seismické hmoty m , zanedbatelné tlumení b a tuhost k . Obecně se snímače výchylky konstruují na kapacitním, indukčním, magnetickém či optickém principu. Jednotlivé snímače se liší účelem použití, tj. frekvencí, výchylkou, jejich přesností a cenou. V současnosti jsou nejpoužívanější indukční snímače, využívající závislosti indukčnosti na proudové hustotě vířivých proudů. Skládají se z kovového stínicího krytu, který slouží k potlačení parazitních vlivů (např. vnější elektromagnetické pole, přívodní kabel k měřicím,...). Kryt dále obsahuje cívku a základní elektroniku, vše spolu dohromady tvoří integrovanou součást. Frekvenční rozsah je obvykle v rozmezí 0 - 10 000 Hz. Při umístění dvou snímačů vzájemně na sebe kolmých, můžeme měřit výchylku hřídele, která je tvaru orbity. [7]



Obrázek 15: Schématický obrázek znázorňující princip funkce snímače výchylky [5]

Kapacitní snímače výchylky

Jejich princip spočívá v převodu naměřené veličiny na změnu parametru definujícího kapacitu kondenzátoru. Obecně je kapacita kondenzátoru dána permitivitou prostředí, délkou a plochou elektrod. Výhodou těchto snímačů je jejich použití v náročných podmínkách. Pro běžné měření se však nepoužívají.

Odporové snímače výchylky

Odporové snímače spojitě snímají polohu odporovým potenciometrem, který je mechanicky spojený s měřeným předmětem a posouvá se po odporové dráze. Odporová dráha je konstrukčně provedena jako izolovaná podložka, na ní je navinut smaltovaný drát, po kterém se pohybuje kontakt nebo odporový element (nekovový). Hlavní výhodou odporových snímačů je vysoké rozlišení a vysoká životnost.

Indukční snímače výchylky

Charakterem indukčních snímačů je citlivost na změnu teploty a nehomogenity měřeného objektu. V současnosti se pro měření výchylky téměř nepoužívají. Jejich užití je vhodné například při vyvažování, kdy jimi měříme otáčky rotoru nebo fázi. [2] [3]

Snímače rychlosti

Rychlost vibrací můžeme měřit více způsoby a to zejména pomocí senzorů zrychlení a následnou integrací výstupního signálu dostaneme rychlost kmitání. Dalšími způsoby měření jsou elektrodynamické a piezoelektrické snímače. Hlavním požadavkem na snímače rychlosti je vysoký součinitel tlumení b , nízká hmotnost seizmické hmoty m a tuhosti k .

Princip absolutního snímače rychlosti vibrací spočívá v pohybu měřicí cívky v magnetickém poli permanentního magnetu, který tvoří seizmickou hmotu snímače. Z měřeného objektu se přenáší kmitavý pohyb na cívku a indukuje se v ní elektromotorické napětí U dle vztahu:

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (11)$$

kde B indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře snímače [T]

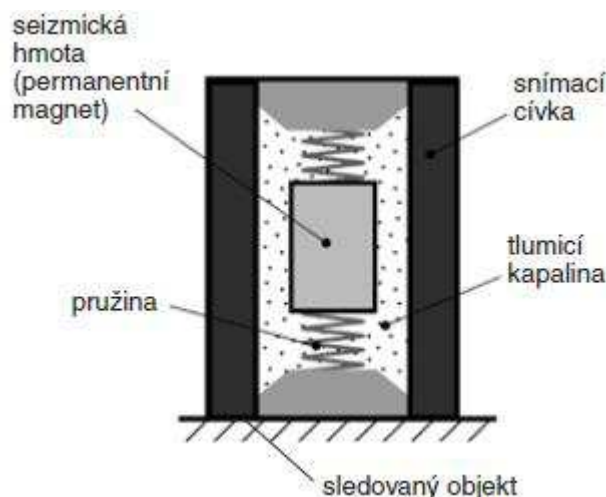
l délka vodiče cívky [mm]

v rychlost kmitání pouzdra snímače [mm/s]

Elektrodynamické snímače rychlosti

Princip absolutního snímače je založen na měření amplitudy kmitajícího pohybu. Jejich uspořádání umožňuje okamžité vyhodnocení rychlosti kmitání pouzdra snímače. Použití nachází v rozsahu měřené amplitudy od 0 až 200 mm nebo v rozsahu frekvence kmitání měřeného objektu od 5 Hz po 10 Hz. Přidáme-li do snímače tlumicí závit, zvýší se frekvenční rozsah měřeného kmitavého pohybu na 1 Hz až 3,5 kHz. Výhodou těchto senzorů je nízká cena, vysoká úroveň výstupního signálu, velmi malý vnitřní odpor a nepotřebnost zdroje napájení. Nevýhodou je omezený horní kmitočet a vyšší citlivost na parazitní magnetická pole.

V současnosti je častější měření rychlosti kmitavého pohybu užitím piezoelektrických snímačů zrychlení (akcelerometrů), kdy integrací signálu z akcelerometru dostaneme rychlost kmitavého pohybu. [3] [7]



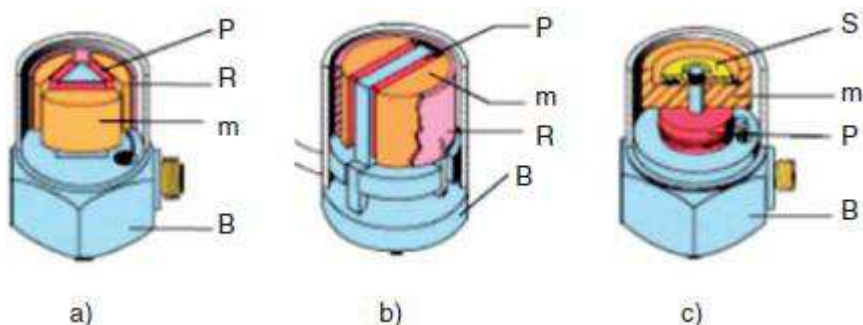
Obrázek 16: Principiální systém elektrodynamického snímače rychlosti vibrací [7]

Snímače zrychlení

V současnosti nejpoužívanějšími snímači zrychlení a snímači vibrací vůbec jsou piezoelektrické akcelerometry. Používány jsou při měření na nepohyblivých částech rotačních strojů. Jeli třeba zjistit výchylku či rychlost kmitavého pohybu, zjistíme je integrací signálu získaného pomocí snímače zrychlení. Požadavky na akcelerometry jsou výrazně velká tuhost připojení ke sledovanému objektu a hmotnost seizmické hmoty několika násobně menší než hmotnost měřeného objektu ($m \ll M$). Princip akcelerometrů je založen na piezoelektrickém jevu. Při deformaci piezoelektrické destičky vzniká elektrický náboj o velikosti úměrné míře deformace destičky. Destička je z keramického materiálu a umístěna je mezi dvěma hmotami. Jednu hmotu tvoří seizmická referenční hmota a druhá je pevně upevněna spolu s pouzdrem snímače na skříni měřeného objektu.

Dojde-li ke kmitání měřeného objektu, začne kmitat i seizmická hmota, která je pevně spojena s pouzdrem snímače. Referenční hmota je v klidu. Vzniká síla, která působí na piezoelektrický prvek a dochází k jeho deformaci. Důsledkem deformace je vznik elektrického náboje, přímo úměrného zrychlení skříně stroje. Jedná se tedy o snímač měřící absolutní vibrace. Součástí akcelerometrů jsou kalibrační křivky, které udávají citlivost snímače zrychlení a jeho frekvenční rozsah použitelnosti. Rozlišujeme více konstrukčních typů akcelerometrů. Velmi častým provedením jsou akcelerometry se smykovým namáháním piezokrystalu, méně časté jsou tradiční akcelerometry s tlakovým namáháním. V současné době se používají konstrukce:

- **Delta Shear** akcelerometry jsou konstrukčně uspořádány tak, že se skládají ze tří dvojic piezokrystalů a seizmických hmot, které jsou upevněny na středovém sloupku s použitým předepnutým prstencem. Výhodou je dobrá linearita, velká citlivost, malá hmotnost vysoká vlastní frekvence. Konstrukčně lze oddělit základnu snímače od snímacího mechanismu, což vede k výrobě snímačů odolnějších proti mechanickému poškození a použití při vyšších teplotách
- **Planar Shear** se konstrukčně liší a to použitím pouze dvou dvojic krystalů a setrvačných hmot. Přednosti jsou totožné s předchozím uspořádáním, avšak mají menší citlivost, která ve výsledku může mít vliv na přesnost měření.
- **Snímač s centrálním tlakovým namáháním** má klasickou, jednoduchou konstrukci. Při větší hmotnosti setrvačné hmoty snímače má výrazně nižší citlivost měření. [2] [7]



Obrázek 17: Konstrukční provedení piezoelektrických akcelerometrů: a) Delta Shear, b) Planar Shear, c) s centrálním tlakovým namáháním (B – těleso snímače, m – seizmická hmota, P – piezoelektrický prvek, R – předpínací prstenec, S – předpínací disk [7])

Kromě nejpoužívanějších piezoelektrických akcelerometrů, můžeme měřit zrychlení kmitavého pohybu pomocí integrovaných tenzometrických nebo kapacitních akcelerometrů. Další možností je použití elektrodynamických senzorů rychlosti s derivačním obvodem. Nevýhodou těchto akcelerometrů jsou vysoké pořizovací náklady. [2] [7]

3.2 Analýza signálu v časové oblasti

Analýza signálu v časové oblasti spočívá ve zkoumání časového průběhu signálu veličin, udávajících parametry vibrací (výchylka, rychlost, zrychlení). V časové oblasti vyhodnocujeme okamžitou, střední a efektivní hodnotu signálu nebo jeho obálky. Dochází-li k náhodným vibracím tj. převládající náhodné složce signálu, můžeme při syntéze použít statických výpočtů. Těmi mohou být například směrodatná odchylka, koeficient špičatosti, koeficient šikmosti a činitel výkmitu (Crest faktor). Použití analýzy vibračního signálu v časové oblasti má svůj význam zejména při přechodových jevech a to například při rozběhu a doběhu motorů, rázových odezvách, nelineárních systémech, u proměnných časových signálů s měnící se frekvencí a kmitajících systémů s proměnou tuhostí nebo proměnným tlumením. Pro náročnější analýzy lze využít číslicových separací signálů, integrální nebo vlnkové transformace, které slouží k určení místa poruchy či k vytvoření animace kmitů.

Vhodná aplikace analýzy vibračního signálů v časové oblasti je zejména, při převládajícím zdroji vibrací nebo se alespoň jedná o zdroj dominantní. Jeli tomu jinak, ztrácí diagnostikovaná informace svoji hodnotu, protože je zkrácena v šumu signálu, který způsobuje přenos vibrace z jednotlivých částí stroje a následné určení místa působení vibrace je obtížné. Pro ideální harmonický signál s kruhovou frekvencí ω , frekvencí f a periodou T platí vztah:

$$X(t) = X_v \cdot \sin \omega t \quad (12)$$

kde $X(t)$ je amplituda, tj. okamžitá hodnota sledovaného signálu v čase t . Místo amplitudy lze popsat harmonický signál i jinými charakteristikami:

Efektivní hodnota

Využití výše uvedených charakteristik lze uplatnit i u popisu neharmonického signálu. Pojem amplituda zde ztrácí svůj smysl, avšak vztahy pro efektivní a střední hodnotu jsou ve vši platnosti. Vibrační signál se zpravidla popisuje efektivní hodnotou, vyjadřující průměrný výkon měřené veličiny.

$$X_{ef} = X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2 dt} \quad (13)$$

Střední hodnota

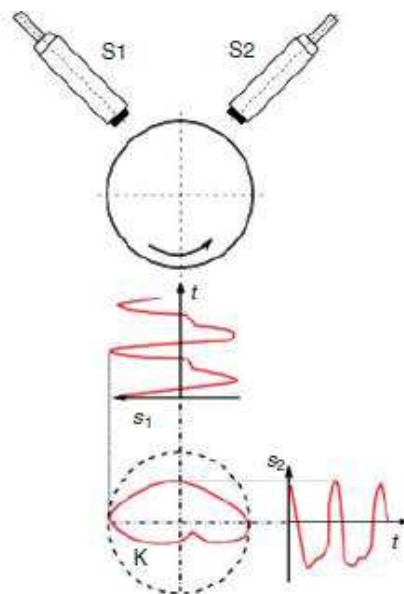
Méně časté v technické praxi při popisu vibračního signálu je použití střední hodnoty. Ta má oproti efektivní hodnotě výrazně menší význam a proto není upřednostňována. Velikost střední hodnoty naměřené veličiny určíme ze vztahu:

$$X_{stř} = \frac{1}{T} \int_0^T |X(t)| dt \quad (14)$$

Kinetická dráha – Orbita

Jednou ze základních metod vibrační diagnostiky je metoda kinematické dráhy tj. maximální výchylky. Její využití se uplatňuje zejména u ložisek, kde je problémem objektivní měření vibrací na ložiskovém tělese a to z důvodu částečného nebo celkového utlumení prostřednictvím maziva. Princip měření spočívá v umístění dvou snímačů výchylky k rotujícímu hřídeli, které jsou natočeny pod úhlem 90° . Naměřením průběhů výchylek hřídele pomocí dvou akcelerometrů v obou osách, můžeme určit dráhu výchylky tzv. orbitu. Dále také určíme velikost maximální výchylky, která je srovnávána s normou předepsanou hodnotou. [2] [7]

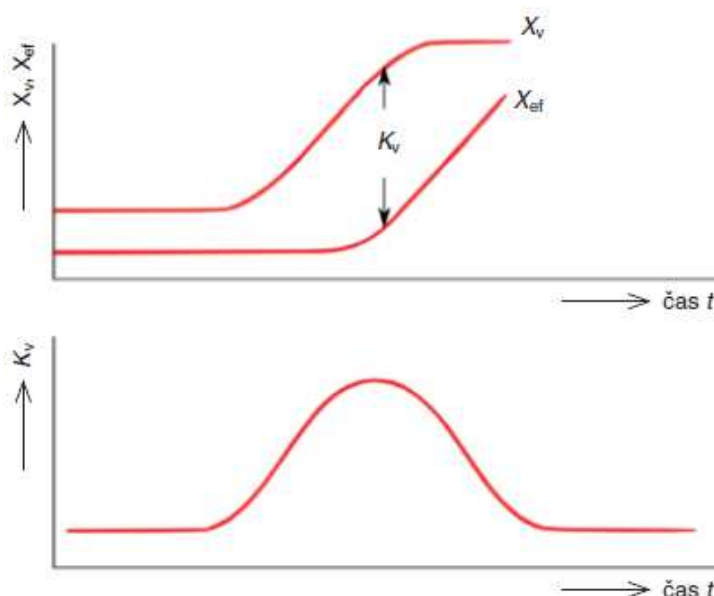
Činitel výkmitu



Obrázek 18: Měření orbity rotujícího hřídele (s_1 , s_2 – složky výchylky snímačů S_1 , S_2 , K – kinematická dráha hřídele) [7]

Dalším způsob, jakým lze analyzovat průběh vibračního signálu spočívá v poměru špičkové a efektivní hodnoty. Tento poměr nazýváme činitel výkmitu (Crest factor CF). Význam tohoto parametru je zřejmý z obrázku 19. Opakující se vibrační signál lze s dostatečným rozlišením popsat špičkovou hodnotou. Časovou posloupností dochází ke zhoršování technického stavu, který se projeví vyšší četností rázů a špičkových hodnot. Zatímco špičková hodnota se ustálí, efektivní hodnota dané veličiny roste. Extrém činitele výkmitu CF v daném časovém průběhu dává informaci o technickém stavu a začínajícím poškození. Hlavní výhodou této metody je především rychlost, úspora z finančního hlediska. Nevýhodou je její přesnost při určování stupně poškození a nevhodné použití při výskytu parazitních rázů.

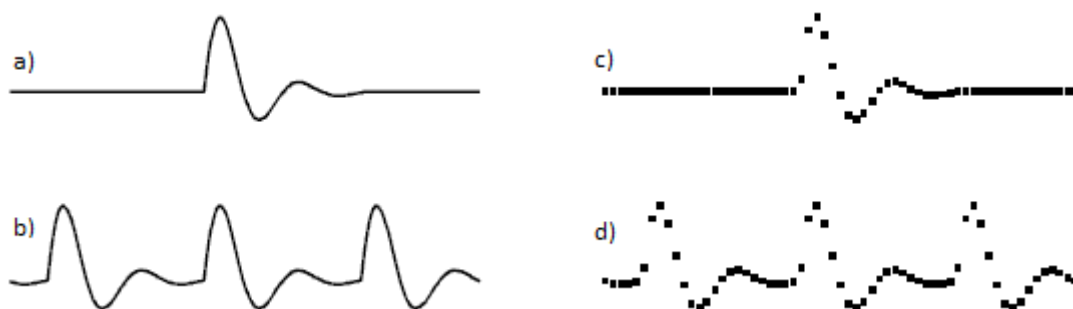
$$CF = \frac{|X_{PEAK}|}{X_{RMS}} \quad (15)$$



Obrázek 19: Význam činitele výkmitu K_V ve vibrační diagnostice [7]

3.3 Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Častější metodou analýzy vibračního signálu je frekvenční analýza. Princip této metody spočívá v analýze časové vlny i s jejími příspěvky od jednotlivých vibrujících částí s různými frekvencemi. Užitím metody frekvenční analýzy lze tyto frekvenční složky ukázat ve vibračním spektru. Lze tak určit závažnost a charakter poruchy, což je hlavní výhodou oproti analýze v oblasti časové. Frekvenční analýza je reprezentována amplitudovým a fázovým spektrem. Základ frekvenční analýzy spočívá v použití Fourierovy transformace. Analýza se provádí rozkladem do Fourierovy řady. Ve vibrační diagnostice se využívá analyzátorů, které se dělí podle typu na provozní, laboratorní, jednokanálové a vícekanálové (až 16 nebo více signálů), avšak princip jejich činnosti je stejný.



Obrázek 20: Příklady signálů v časové, frekvenční oblasti a jejich transformace: a) spojitý neperiodický signál – FFT, b) spojitý periodický signál – FR, c) nespojitý neperiodický signál – DTFT, d) nespojitý periodický signál – DFT [2]

Fourierova řada periodické funkce

Základním předpokladem pro analýzu ve frekvenční oblasti je, že jakákoliv periodická funkce $f(t)$ s periodou T může být vyjádřena sumou harmonických funkcí (sinus, kosinus). Frekvence těchto funkcí jsou násobkem základní frekvence, která je dána periodou daného signálu. Jedná se o tzv. Fourierovu řadu periodické funkce v časové oblasti, která vede na sérii diskrétních frekvenčních složek v oblasti frekvenční:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad (16)$$

kde koeficienty jsou dány vztahy:

- a_0 je stejnosměrná složka:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (17)$$

- a_n, b_n jsou Fourierovy koeficienty tvořící spektrum funkce $f(t)$, T je perioda signálu, n je řád harmonické:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (18)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (19)$$

Často se Fourierovy koeficienty zobrazují ve tvaru amplitudy n -té harmonické složky (A_n) a fázového úhlu (φ_n).

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (20)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n} \quad (21)$$

Při uvážení velikosti harmonické složky a fázového úhlu, lze Fourierovu řadu zapsat ve spektrálním tvaru:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \varphi_n\right) \quad (22)$$

Kde posloupnost amplitud A_n jednotlivých harmonických složek periodické funkce $f(t)$ je amplitudové spektrum. Posloupnost počátečních fází φ_n nazýváme fázovým spektrem periodické funkce $f(t)$. Oproti Laplaceově transformaci je výhodou Fourierovy transformace, že umožňuje pracovat se signálem s časem $t < 0$. Fourierovu transformaci spojitého signálu $x(t)$ definujeme vztahem:

$$\mathcal{F}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (23)$$

Zpětná transformace do časové oblasti pak je:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(f) e^{j2\pi f t} df \quad (24)$$

kde f odpovídá frekvenci, imaginární jednotka je j . Často je frekvence f ve vzorcích zaměněna za úhlovou frekvenci $\omega = 2\pi f$. Vzorce popisující Fourierovu transformaci spojitého signálu jsou vhodné při transformaci neperiodického spojitého signálu, kdy výsledkem je spojitě neperiodické spektrum $\mathcal{F}(f)$, které bývá komplexního charakteru.

$$\mathcal{F}(f) = \text{Re}(f) + j\text{Im}(f) = |\mathcal{F}(f)| e^{j\varphi(f)}$$

kde $\varphi(f)$ je opět fázové spektrum signálu a $|\mathcal{F}(f)|$ je označováno amplitudovým spektrem nebo také amplitudová spektrální hustota.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

V aplikacích užívajících počítačového zpracování signálu se používá diskrétní Fourierovy transformace. Tato transformace pracuje s diskrétním (tj. nespojitým v čase) periodickým či neperiodickým signálem, který transformuje z časové do frekvenční oblasti. Naměřený signál $f(t)$ je zpracováván numericky a vzorkován v analogově-číslicovém převodníku, tj. jsou určeny jeho hodnoty v okamžiku vzdáleném o periodu vzorkování T_v při vzorkovací frekvenci f_v . Vstupem do DFT je tedy diskrétní navzorkovaný signál a výstupem diskrétní spektrum tohoto signálu.

Diskrétní Fourierova transformace pracuje s konečnou posloupností v oblasti časové i frekvenční a je definována vztahy:

$$\mathcal{F}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (25)$$

kde $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, platí pro přímou transformaci z časové do frekvenční oblasti a pro zpětnou transformaci z frekvenční do časové oblasti definujeme vztah:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathcal{F}(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (26)$$

kde $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Výsledkem analýzy N hodnot signálu je N hodnot spektra s frekvencemi rozložených v rozmezí od nuly do frekvence:

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{NT} \quad (27)$$

Kde T je časový interval mezi jednotlivými vzorky a NT je potom délka celkového časového signálu. Množinou těchto funkcí je diskretní Fourierova transformační mřížka (DFT grid) a rozestupy mezi frekvencemi jednotlivými vzorků se nazývá frekvenční bin - Δf .

Z praktického hlediska se jeví užítí diskretní Fourierovy transformace, jako nejvhodnější. Vstupním signálem je diskretně vyjádřený signál, jehož zpracováním výsledkem je diskretní spektrum vzorků signálu, které je dále číslicově zpracováváno. Diskretní spektrum ve frekvenční oblasti je tak ekvivalentní periodickému vyjádření v oblasti časové.

Lze tedy považovat délku vstupního signálu N (periodického i neperiodického) za jednu periodu signálu, který poskytuje dané spektrum. Dále definujeme kromě frekvence i úhlovou frekvenci $\omega = 2\pi f$, jednotkou je rad/s a normovanou kruhovou frekvenci θ s jednotkou rad :

$$\theta = \frac{\omega}{f_{vz}} = 2\pi \frac{f}{f_{vz}} \quad (28)$$

Výsledek diskretní Fourierovy transformace můžeme dle jeho periodického spektra rozdělit na oboustranné (dvoustranné) spektrum. Výsledek je tedy tvořen pravostranným a levostranným spektrem v závislosti na hodnotě počtu vzorků. Stejnoseměrná hodnota je v $\mathcal{F}(0)$. Pro reálné signály stačí pracovat pouze s pravostranným spektrem, kdežto u komplexního signálu je potřeba uvažovat obě poloviny.

Pravostranné spektrum:

$$\mathcal{F}(1), \dots, \mathcal{F}\left(\frac{N}{2} - 1\right) \quad (29)$$

Levostranné spektrum:

$$\mathcal{F}\left(\frac{N}{2}\right), \dots, \mathcal{F}(N) \quad (30)$$

Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Výpočet Rychlé Fourierovy transformace je velmi časově náročný, jelikož i pro malý počet vzorků neúměrně narůstá čas výpočtu, proto se používají různé algoritmy. Nejrozšířenějším z nich je bez pochyby Cooleyho a Tukeyho algoritmus, často nazýván algoritmem decimování v čase. Podstatou tohoto algoritmu je redukce počtu násobení zejména u komplexních čísel, protože to je zpravidla náročnější na výpočetní systém než jejich sčítání. Výpočtem dosáhneme stejného výsledku jako u diskrétní Fourierovy transformace, ale několikanásobně rychleji. Podle definice DFT platí pro signál o N vzorcích, že k vyčíslení koeficientů F_k pro $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ je třeba N^2 sčítání a N^2 násobení komplexních čísel.

Princip rychlé Fourierovy transformace spočívá ve volbě počtu vzorků $N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Délky záznamů tak mohou být např. $N = 128, 256, 512, 1024$, atd. Rychlý algoritmus spočívá v předpokladu, že N je sudé číslo a potom lze rovnici (26) upravit na tvar:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad \text{kde } n = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (31)$$

Vzorky signálu se poté rozdělí na skupiny sudých a lichých vzorků a to následovně:

$$e_n = x_{2n}, \quad o_n = x_{2n+1}, \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (32)$$

Poté můžeme transformaci přepsat na tvar:

$$\begin{aligned} F_n &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left(e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} + o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k+1)n} \right) = \\ &= \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} + e^{-j\frac{2\pi}{N}n} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} \end{aligned} \quad (33)$$

Nyní označíme výrazy E a O :

$$E_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n}, \quad O_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} \quad (34)$$

Výsledná transformace pak bude ve tvaru:

$$F_n = \begin{cases} E_n + e^{-\frac{2\pi i}{N}n} O_n & \text{pro } n < \frac{N}{2} \\ E_{n-\frac{N}{2}} - e^{-\frac{2\pi i}{N}(n-\frac{N}{2})} O_{n-\frac{N}{2}} & \text{pro } n \geq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (35)$$

Došlo tedy k separaci Fourierovy transformace s N prvky na dvě transformace obsahující $N/2$ prvků a stejným postupem pokračuje výpočet až do doby, kdy budou zbývající pouze dva prvky. Algoritmus tedy snižuje počet operací transformace, které vykonávají výpočet z N^2 na $N \log_2 N$.

Princip algoritmu spočívá v předpokladu symetrie a periodicity otáčejícího činitele W_N :

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (36)$$

Počet vzorků N tedy udává dobu výpočtu, která exponenciálně roste s jeho hodnotou. Například pro $N = 200$ prvků je výpočet 200 krát rychlejší než při diskrétní Fourierově transformaci.

Okna Fourierovy transformace

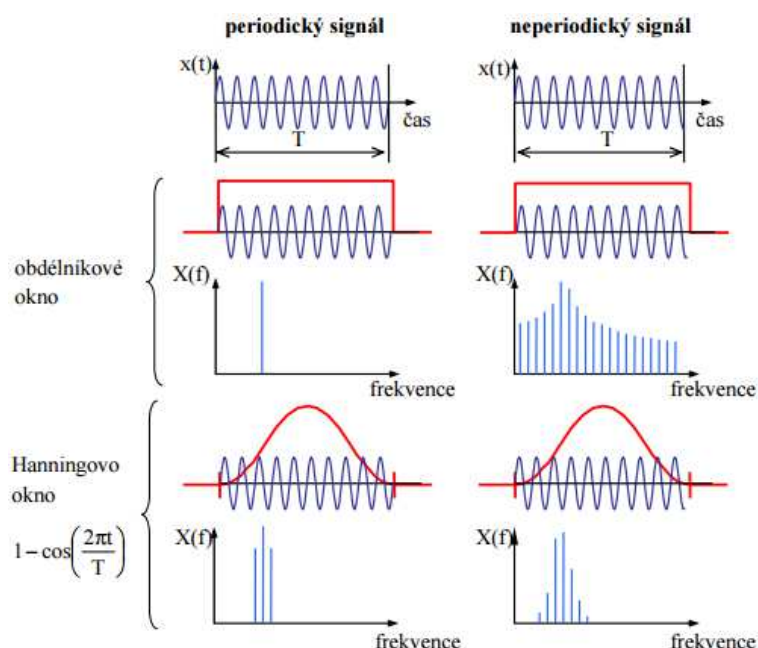
V praxi je běžné, že naměřené signály od vibrací, nevyvážeností a dalších běžných závad jsou neperiodického průběhu. Perioda mnohdy není z naměřeného signálu zřetelně vyznačena, v důsledku toho může být zvýšený výskyt zkreslení spektra naměřeného signálu. Zkreslení tohoto typu se nazývá únik (leakage). Předcházet zkreslení lze vhodnou úpravou signálu. Princip úpravy signálu spočívá v použití tzv. váhových oken, kdy původní signál je ve frekvenční oblasti násoben váhovou funkcí. Dojde ke změně původního signálu a v podstatě se na něj díváme, jako na okno určitého tvaru.

Vstupuje-li do FFT periodický signál, není nutné použití váhového okna, v analyzátorech je tak nastaveno základní obdélníkové okno (Obrázek 21). Ve své podstatě se jedná o prostý výřez z původního signálu bez úpravy amplitudy. Výsledkem transformace je pro periodický sinusový signál jedna spektrální čára. Ve druhém případě, kdy je vstupující signál neperiodický (Obrázek 21). Je zřejmá určitá paralela s periodickým signálem, avšak doba měření je odlišná a vede ke vzniku neperiodického signálu. Výsledné spektrum je zkreslené, protože obsahuje i mnoho spektrálních čar ve formě uniklé energie. Algoritmus FFT se snaží nespojitost vstupního signálu namodelovat použitím nekonečného množství další sinusových signálů. To vede ke zkreslení spektra signálu a nevypovídající informaci o původním signálu.

K předejití této chyby se používá Hanningova okna. Naměřený signál (vstupní do FFT) je na obou koncích potlačen na nulovou hodnotu a tím je upravena amplituda signálu. Toho dosáhneme násobením signálu oknem, kdy výsledkem je odstranění nespojitosti a výběr úseku ke zpracování. Začátek a konec signálu na sebe navazují, signál je periodický a nezahrnuje nespojitosti. Nevýhodou Hanningova okna je přítomnost jeho samotného spektra, které se sčítá se spektrem analyzovaného signálu.

Existují i další typy oken, které jsou ve vibrodiagnostice používány:

- *Flat top* – hlavním charakterem okna s plochým vrchem oproti oknu Hanningovu je nezkreslená amplituda. Použití je zejména pro kalibrování snímačů.
- *Transient* – přechodové okno je v podstatě obdélníkové s kratší dobou, než je perioda měření. Z principu se používá pro signály s kratším působením.
- *Exponenciální okno* – jehož použití je pro naměření odezvy signálu, jakou mohou být třeba odezvy způsobené rázovým buzením. [2] [15]



Obrázek 21: Význam váhových oken při periodickém a neperiodickém signálu [2]

3.4 Kmitočtové filtry

Z hlediska analýzy naměřených vibračních signálů je žádoucí se zaměřit i na jejich úpravu. K tomu slouží kmitočtové filtry, díky kterým lze potlačit a propustit nežádoucí frekvenční šum ve výsledném frekvenčním spektru od vyšších harmonických frekvencí. Což je ve své podstatě velice přínosné, protože po filtraci signálu zbyde pouze část, na kterou se chceme v analýze zaměřit. Filtry mohou být sestaveny mnoha způsoby. Způsob jakým je filtr navržen se ve výsledku projevuje i na jeho vlastnostech. Zejména jsou tvořeny diskrétními součástkami (odpor, kondenzátor, cívka, operační zesilovače,...). Dalšími způsoby jsou realizace prostřednictvím integrované části a s číslicovým zpracováním signálu. Jednou z vypovídajících vlastností filtru je rychlost útlumu, která je určena řádem filtru. Čím větší řád filtru je, tím rychleji dokáže potlačit vybrané pásmo. Avšak s rostoucím řádem se zvyšuje složitost výroby daného filtru a také cena. Doporučuje se v praxi volit řád filtru optimálně, tzn. maximálně deset. Základními typy filtrů jsou:

- dolní propust (DP, low-pass, propouští kmitočty menší než horní mezní kmitočet)
- horní propust (HP, high-pass, propouští kmitočty větší než dolní mezní kmitočet)
- pásmová propust (PP, band-pass, propouští vybrané pásmo kmitočtů)
- pásmová zadrž (PZ, band-stop, zadržuje vybrané pásmo kmitočtů)

Vlastnosti filtrů zpravidla popisuje jejich modulová (amplitudová) nebo fázová frekvenční charakteristika. Dalším parametrem je přenos napětí K_u v komplexním tvaru nebo jej lze vyjádřit poměrem amplitud výstupního a vstupního signálu, modulem K_u a fázovým posuvem φ . [9] [10]

$$K_u = K_u \cdot e^{j\varphi} = \frac{U_2 e^{j\varphi_2}}{U_1 e^{j\varphi_1}}, \quad K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (37)$$

Častěji se však vyjadřuje přenos ve funkci s kmitočtem, kdy výsledný přenos je ve tvaru racionální lomené funkce. I v tomto případě lze přenos rozdělit na modulovou a argumentovou

část. Jak už bylo zmíněno, s rostoucím řádem se zvyšuje kvalita potlačení daného signálu. Řád filtru také určuje minimální počet akumulacních prvků (cívek, kondenzátorů). [10]

Při návrhu filtrů vyšších řádů jsou dány kroky, podle kterých je dobré postupovat. V první řadě se stanoví toleranční pole modulové charakteristiky. V němž při splnění vstupních požadavků leží modulová charakteristika přenosové funkce. Toto pole může obsahovat větší množství přenosových funkcí vyhovující dané charakteristice. Je třeba vybrat ty přenosové funkce s nejnižším řádem, které jsou zároveň nejjednodušší a nejlevněji realizovatelné. Této fázi se nazývá aproximační úloha, spočívající ve výběru z již standartních přenosových funkcí, které byly vytvořeny v závislosti na parametrech modulových charakteristik. Existuje několik typů aproximací, které lze provádět v prostředí programu LabVIEW a ty budou dále objasněny.

Výsledkem aproximace je dosažení koeficientů dané přenosové funkce, které splňují zadané toleranční pole modulové charakteristiky. Teoreticky lze při aproximaci dojít k nekonečnému množství řešení, proto se nejčastěji používají základní varianty aproximací. [9] [10]

Butterworthova aproximace

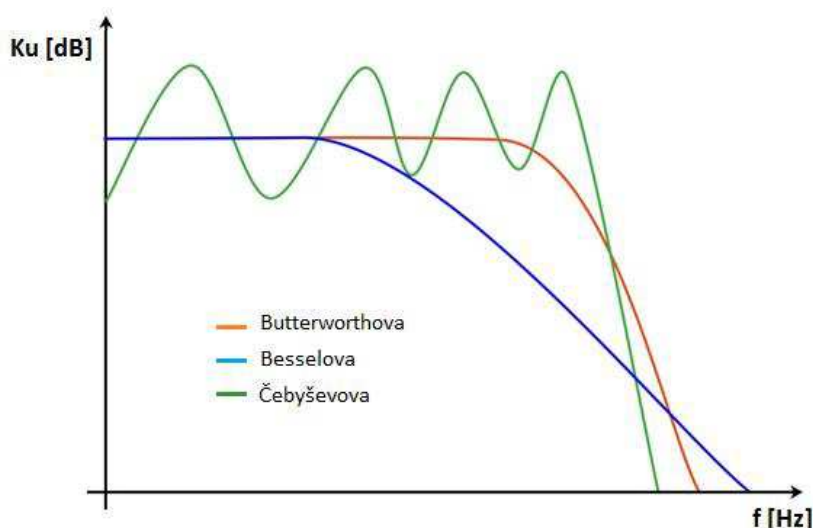
Jedná se o jednu z nejužívanějších aproximací a to z důvodu jisté vyváženosti mezi žádoucím lineárním průběhem fázové charakteristiky a útlumem modulové charakteristiky, kterého lze dosáhnout s nižším řádem filtru. Další výhodou této aproximace je poměrně jednoduchý algoritmus pro získání koeficientů přenosové funkce. Nejčastěji se používá u filtrů v regulační technice.

Čebyševova aproximace

Průběh modulové charakteristiky v propustném pásmu se zde liší. Oproti Butterworthově aproximaci je charakteristika zvlněná a jedná se o nejméně tlumené filtry, což je hlavní poznávací charakter Čebyševovi aproximace. Při jejím použití lze získat nejstrmější charakteristiky v propustném pásmu a velké potlačení signálu v pásmu nepropustném. Nevýhodou je zvýšená nelinearita fázové charakteristiky.

Besselova aproximace

Hlavním charakterem této aproximace je monotónní, plochý průběh modulové charakteristiky v propustném pásmu a také strmější oproti Butterworthově aproximaci. Vlastnosti Besselovy aproximace předurčují její užití v praxi. Používá se při požadavku na neměnění se tvar signálu, který daným filtrem prochází. Dále se v praxi používá pro filtrování kmitočtových a fázových



Obrázek 22: Porovnání modulových charakteristik filtru DP pro jednotlivé typy aproximací [10]

modulovaných signálů. Hlavní nevýhodou je malá strmost modulové charakteristiky. Vyšší strmosti lze s obtížností dosáhnout avšak za cenu vyššího řádu a tím i zvýšené složitosti. Použití Besselových filtrů je hlavně v telekomunikační oblasti. [9] [10]

4 LABVIEW

Vývojové prostředí LabVIEW (z angl. Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) čili „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“ někdy též LV, je produktem americké firmy National Instruments, která je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace. Technické disciplíny, které zažívají veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu. Prostředí LabVIEW, nazývané též jako G-jazyk („grafický“ jazyk), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti, ale také k programování složitých systémů, jako je třeba robot. S určitou nadsázkou lze říci, že prostředí LabVIEW nemá omezení své použitelnosti. Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit dočasně nebo i trvale prostorově, finančně, mnohdy i časově náročné využití technických prostředků (hardware), řešením virtuálním (zdánlivým) za přispění programových prostředků (software). Zejména pak grafickými, vizuálními prostředky a zprostředkovat tak uživateli maximální přehled. Prostředí programu se skládá ze dvou pracovních oken:

Front panel

Obrazovka čelního panelu (front panelu) je tvořena uživatelským rozhraním zvolených ovládacích a zobrazovacích prvků. Tato část programu určuje vzhled a chování uživatelského rozhraní. Hlavními částmi jsou ovládací a indikační prvky, díky kterým můžeme řídit chod aplikace, změnu a zadávání parametrů a také získávání výsledků. Výhodou čelního panelu je, že jednotlivé objekty lze jednoduše upravovat, měnit velikosti okna, nastavit jejich vlastnosti. Prvky se dělí na dvě největší skupiny vstupy a výstupy. Do vstupů lze zařadit různé ovladače, jako jsou například tlačítka, otočné knoflíky, posuvné, textové nebo číselné ovladače a jiné. Výstupy jsou zastoupeny různými indikátory v podobě číselných či textových zobrazovačů. V nástrojové liště čelního panelu se nachází hlavní ovládací prvky a indikátory, které slouží k ovládání a spouštění programu.

Block diagram

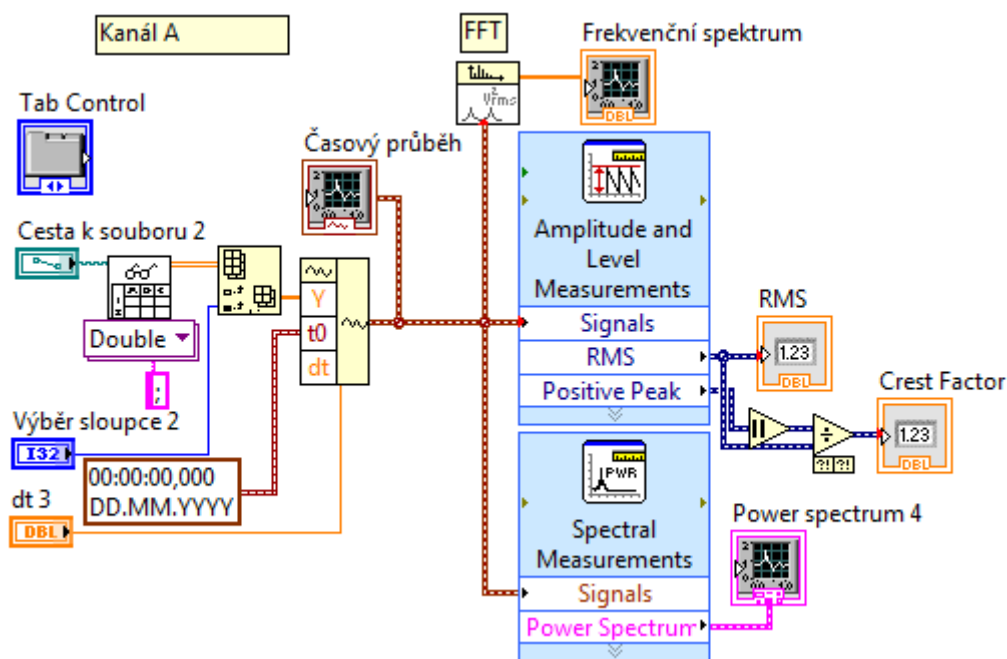
Druhé okno programu je tvořeno blokovým diagramem. V tomto okně je uživatelem definován algoritmus programu. Jednotlivé prvky jsou navzájem propojeny s prvky v čelním panelu a také s jejich parametry. Nástrojová lišta je obdobná té liště, která je v čelním panelu. I zde se dá program jednoduše ovládat. Spouštět program lze v běžném chodu nebo po částech. Veškeré grafické prvky v blokovém diagramu tvoří zdrojový program. Prvky pro vykonání programu se nazývají jednotlivými uzly. Rozeznáváme tři typy uzlů a to: funkce, SubVI a struktura. Základní operace se provádějí pomocí funkcí (sčítání, odečítání, porovnání, práce se soubory, a další). Uzel typu SubVI se používá pro další práci v jiném virtuálním nástroji. Pomocí struktury řídíme průběh programu a to smyčkami While, For, atd.. [12]

4.1 Program pro měření s VIBXpert II

Naměřené data prostřednictvím diagnostického zařízení VIBXpert II byly dále zpracovávány v programu LabVIEW. Pro zajištění správného importu do programu, je důležité naměřená data uložit ve formátu .csv. Jak už bylo zmíněno program Labview se skládá ze dvou pracovních oken, Blokového diagramu a Čelního panelu. Vytvořený program obsahuje vstupní blok pro načtení naměřených dat. V čelním panelu můžeme prostřednictvím tlačítka zvolit, který sloupec má být v grafu zobrazen. Importovaný signál je signálem vstupním do bloku *Spectral measurement* a bloku *Amplitude and Level Measurement* (Obrázek 23). V první části je provedena Fourierova transformace přivedeného signálu, výsledkem je zobrazené frekvenční spektrum (Obrázek 24). Pro hodnocení vibrací je důležité v programu vytvořit část s výpočtem efektivní hodnoty a Crest faktoru. Tyto hodnoty jsou porovnávány s tabulkou předepsaných mezních hodnot podle normy. Výpočet obou hodnot efektivní hodnoty (RMS) a činitele výkmitu (CF) je zajištěn ve druhé části programu.

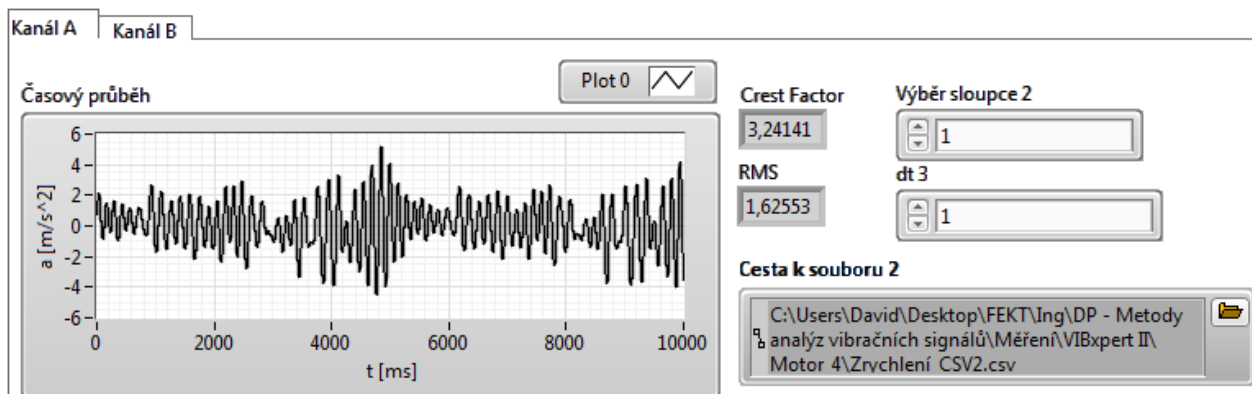
Čelní panel obsahuje grafické zobrazení časového průběhu naměřeného signálu (Obrázek 24). Na dalším grafu je zobrazeno frekvenční spektrum, které je výsledkem spektrální analýzy. Důležitou částí je blok s cestou k souboru, kdy výběrem umístění lze určit souboru s naměřenými daty. Dále je zde umístěno tlačítko pro výběr analyzovaného sloupce z datového souboru. Součástí jsou také indikátory s hodnotou RMS a CF. Tyto grafické zobrazovače spolu s tlačítky tvoří jeden panel. V čelním panelu můžeme přepínat mezi kanálem A a kanálem B. Výsledky jsou tak přehledně zpracovány pro oba kanály, za předpokladu správné volby sloupce s naměřenými hodnotami.

Program byl odladěn pro naměřené signály všech měřených motorů. Z naměřených dat rychlosti a zrychlení pro kanály A, B byly získány výsledky spektrální analýzy, spolu s efektivní hodnotou a Crest faktorem.



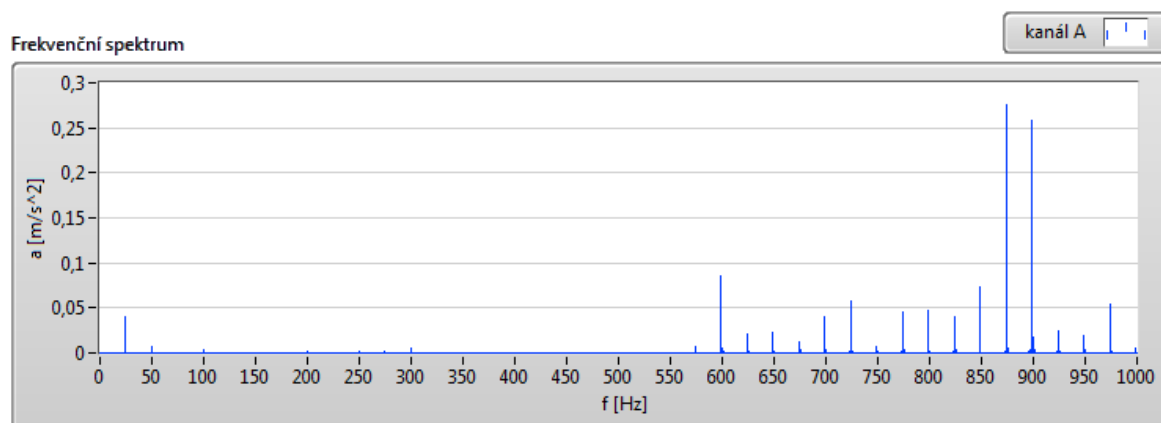
Obrázek 23: Program v LabVIEW – Block panel

Na obrázku 24 je vidět prostředí programu ve Front panelu. Položku pro výběr cesty k naměřeným datům, časový průběh vibrací, vypočítaná efektivní hodnota a Crest faktor. V záhlaví je možné přepínat mezi jednotlivými měřeními kanály.

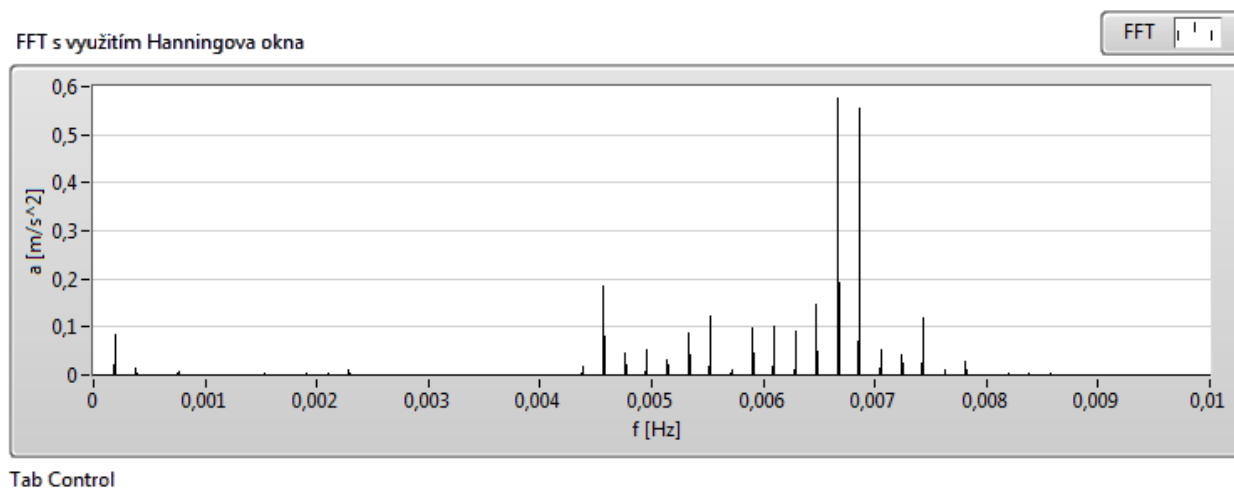


Obrázek 24: Program v LabVIEW – Front panel, časový průběh

Dále zde je výsledné frekvenční spektrum (Obrázek 25) z rychlé Fourierovy transformace časového signálu do oblasti frekvenční. Stejně tak i frekvenční spektrum s aplikací Hanningova okna (Obrázek 26).



Obrázek 25: Program v LabVIEW – Front panel, frekvenční spektrum



Tab Control

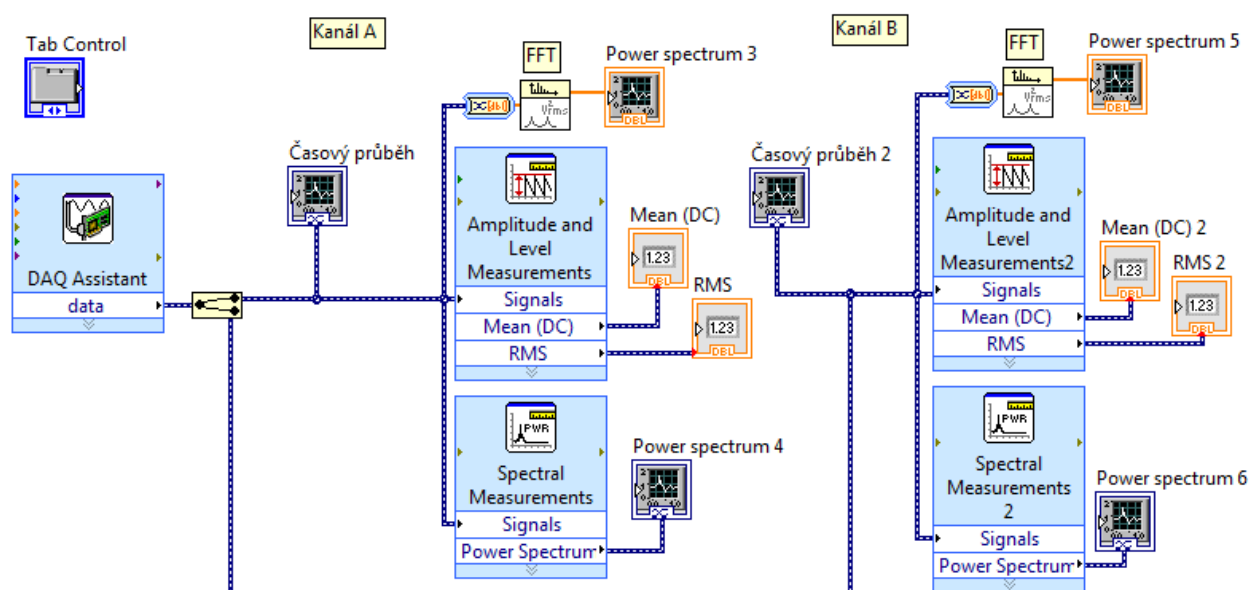
Obrázek 26: Program v LabVIEW – Front panel, frekvenční spektrum s aplikací Hanningova okna

4.2 Program pro měření s DAQ asistentem

Struktura programu se od měření pomocí vibrodiagnostického zařízení moc neliší. Bloky určené pro načtení jsou zde nahrazeny samotným měřicím prvkem DAQ asistentu. Ve vlastnostech tohoto prvku byly zadány kalibrační data akcelerometrů pro kanál A a kanál B. (Tabulka 18)

Dalšími částmi programu jsou již samotné zobrazení grafů pro oba kanály. Signál z DAQ asistentu je třeba rozdělit na dva dílčí signály. Dále pak pro daný kanál je v blocích *Amplitude and Level Measurements* provedeno měření efektivní a střední hodnoty dané veličiny. V bloku *Spectral Measurements* je pro signál z DAQ asistentu provedena spektrální analýza, jejímž výstupem je frekvenční spektrum s aplikací Hanningova okna. Třetí menší částí programu je rychlá Fourierova transformace (Obrázek 27). V případě čelního panelu se program změnil pouze v části načítání měřených dat. Jelikož měřené hodnoty jsou přímo získány z DAQ asistentu, není již nutné mít na čelním panelu prvky pro výběr dat.

Pro zobrazené průběhy platí stejné podmínky, jako v případě předchozího měření. V grafech jsou zobrazeny dvě periody otáčení rotoru, tedy dvě periody průběhu vibrací daného motoru. Jedna perioda trvá přibližně 40 ms a její hodnota byla určena z otáček motoru naprázdno. Jednotlivé periody jsou odděleny svislou šedou čarou.



Obrázek 27: Vytvořený program v LabVIEW s DAQ asistentem – Block diagram

5 MĚŘENÍ A ANALÝZA NA DANÉM STROJI

5.1 Měření asynchronního motoru

V praktické části práce byly měřeny čtyři typově stejné asynchronní motory s definovanou, odlišnou výrobní vadou. První měření probíhalo prostřednictvím vibrodiagnostického zařízení VIBXpert II, spolu s kapacitními akcelerometry. Druhá část měření vibrací byla zaměřena zejména na program LabVIEW a DAQ asistentem, který představuje PXI měřicí platforma od National Instruments. Parametry motorů jsou obsaženy v následující tabulce:

Tabulka 1: Štítek motorů TM90-4S B3 1,2,3,4

ASM	TYP: TM90-4S B3	
1100 W	Režim použití: S1	
Y/D 400/230 V	1400 ot. /min	
2,7 / 4,68 A	cos φ : 0,78	IP 54
2p = 4	f = 3 ~ 50 Hz	

Tabulka 2: Definované poruchy na asynchronních strojích – Motor 1,2,3,4 [3]

Označení motoru	Statická excentricita [mm]	Dynamická excentricita [mm]
1	0 – 0,015	0 – 0,015
2	0 – 0,015	0,040 – 0,050
3	0,040 – 0,050	0 – 0,015
4	0,040 – 0,050	0,040 – 0,050

Tabulka 3: Hodnocení vibrací na základě mezních hodnot kmitání ČSN EN 60034-14 [14]

Výška osy	[mm]	56 ≤ h ≤ 132			132 ≤ h ≤ 280			280 < h		
Stupeň vibrací	Uložení	s	v	a	s	v	a	s	v	a
		[μm]	[mm/s]	[m/s ²]	[μm]	[mm/s]	[m/s ²]	[μm]	[mm/s]	[m/s ²]
A	Pevné	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Pružné	21	1,3	2	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Pevné	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Pružné	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

A - stroje bez zvláštních požadavků na vibrace

B - stroje se zvláštními požadavky na vibrace

Výpočet frekvencí běžných ložiskových závad

Jak už bylo zmíněno výše, předmětem měření jsou čtyři typově stejné asynchronní motory. Konkrétně se jedná o motory typu **TM90-4S B3** od výrobce EMP Slavkov. Z projektové dokumentace je snadné zjistit, jaký typ ložisek se v daných motorech nachází. V našem případě se jedná o jednořadá radiální kuličková ložiska typu **6206 2Z C3**. Parametry a rozměry jsou uvedeny v tabulce. [13]

Tabulka 4: Parametry ložiska SKF 60206 - 2Z

Ložisko	Vnitřní průměr	Vnější průměr	Šířka	Počet valivých element	Průměr valivého elementu	Roztečný průměr	Úhel osy rotace axiálního zatížení
	d [mm]	D [mm]	B [mm]	N [-]	B _d [mm]	P _d [mm]	φ [°]
SKF 6206-2Z	30	62	16	9	8	38,5	0

Přirozeným vyvíjecím procesem vibrodiagnostiky byly odvozovány řady vzorců pro výpočet konkrétních závad na valivých ložiscích. Tyto výpočty jsou závislé na geometrii, počtu valivých prvků a na frekvenci otáčení ložiska.

Podle místa poruchy se závady valivých ložisek rozdělují na čtyři typy:

Závada na vnitřním kroužku,

$$BFPI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n$$

Závada na vnějším kroužku,

$$BFPO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n = N \cdot FTF$$

Závada na valivém tělísku

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right] \cdot n$$

Závada na kleci [2]

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n$$

kde n otáčky rotoru [min^{-1}]

N počet valivých elementů [-]

B_d průměr valivého elementu [mm]

P_d roztečný průměr [mm]

φ kontaktní úhel [°]

Výpočet

Závada na vnitřním kroužku

$$\text{BFPI} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n = \frac{9}{2} \left(1 + \frac{8}{38,5} \cdot \cos 0 \right) \cdot 24,83 = 137,27 \text{ Hz}$$

Závada na vnějším kroužku

$$\text{BFPO} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n = \frac{9}{2} \left(1 - \frac{8}{38,5} \cdot \cos 0 \right) \cdot 24,83 = 86,20 \text{ Hz}$$

Závada na valivém tělísku

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2B_d} \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right] \cdot n = \frac{38,5}{2 \cdot 8} \left[1 - \left(\frac{8}{38,5} \cdot \cos 0 \right)^2 \right] \cdot 24,83 = 57,16 \text{ Hz}$$

Závada na kleci

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) \cdot n = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{8}{38,5} \cdot \cos 0 \right) \cdot 24,83 = 9,84 \text{ Hz}$$

Tabulka 5: Tabulka vypočtených hodnot frekvencí běžných ložiskových závad

Zkratka	Závada	Frekvence [Hz]
BFPI	Závada na vnitřním kroužku	137,27
BFPO	Závada na vnějším kroužku	86,20
BSF	Závada na valivém tělísku	57,16
FTF	Závada na kleci	9,84

V tabulce 5 jsou uvedeny vypočtené frekvence ložiskových závad pro motory TM90-4S B3 s parametry ložiska SKF 60206 - 2Z. Frekvence závady na vnitřním kroužku je 137,27 Hz. Závada na vnějším kroužku se podle teoretických výpočtů projevuje na frekvenci 86,20 Hz. Další závady jsou závada na valivém tělísku a závada na kleci, jejichž frekvence jsou 57,16 Hz a 9,84 Hz.

Jedná se o teoretický výpočet frekvencí možného výskytu daných závad. Tyto závady se mohou projevit na vypočtených frekvencích ve frekvenčním spektru s určitou amplitudou zrychlení vibrací.

Výpočet frekvencí statické a dynamické excentricity

Jelikož všechny čtyři měřené asynchronní motory mají definované statické a dynamické excentricity, je nutné určit frekvence odpovídající těmto závadám. Tyto frekvence pak budou jednodušeji identifikovatelné ve frekvenčním spektru.

Statická excentricita

Vlivem statické excentricity dochází k velkým vibracím zejména v radiálním směru se základní frekvencí:

$$f_s = 2 \cdot f = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Hz} \quad (38)$$

kde $f = 50 \text{ Hz}$ je frekvence napájecí sítě

Další frekvence projevující se ve frekvenčním spektru pak jsou ve většině případů kolem frekvence f_s . Výpočet pro tyto frekvence je následující:

$$\Delta f_{STAT} = f \left(\frac{i \cdot Q_R \cdot (1 - s)}{p} \pm k_1 \right) \quad (39)$$

kde: i řád harmonické (celé číslo)

Q_R počet rotorových drážek ($Q_R = 28$, viz. dokumentace ASM [13])

s skluz

p počet pólových dvojic

k_1 konstanta ($k_1 = 0, 2, 4, 6, \dots$)

Možné hodnoty dalších frekvencí statické excentricity jsou v následující tabulce. Důležitý je první sloupec tabulky, kdy pro první harmonickou v závislosti na konstantě k_1 jsou uvedeny frekvence projevující se ve frekvenčním spektru.

Tabulka 6: Tabulka vypočtených hodnot frekvencí pro statickou excentricitu

řád harmonické	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
konstanta k_1	Δf_{STAT}	Δf_{STAT}	Δf_{STAT}	Δf_{STAT}	Δf_{STAT}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
$k_1 = 0$	695	1391	2086	2782	3477
$k_1 = 2$	795	1491	2186	2882	3577
$k_1 = 4$	895	1591	2286	2982	3677
$k_1 = 6$	995	1691	2386	3082	3777

Dynamická excentricita

Nejprve určíme frekvenci otáčení rotoru, která je dána vztahem:

$$f_R = \frac{n}{60} = \frac{1490}{60} = 24,83 \text{ Hz} \quad (40)$$

Skluzová frekvence je pak:

$$f_{SK} = f \cdot s = f \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = 50 \cdot \frac{1500 - 1490}{1490} = 0,34 \text{ Hz} \quad (41)$$

kde: n otáčky rotoru (ve stavu naprázdno byly otáčky $n = 1490 \text{ min}^{-1}$) [min^{-1}]

f frekvence napájecí sítě [Hz]

s skluz

n_1 synchronní otáčky [min^{-1}]

Opět i dynamická excentricita působí na dalších frekvencích. K vibracím dochází v okolí frekvence otáčení rotoru f_R , které má postranní pásmo o velikosti $2 \cdot f_{SK}$ a další kmitání na frekvencích:

$$\Delta f_{DYN} = f \left(\frac{(i \cdot Q_R \pm k_e) \cdot (1 - s)}{p} \pm k_1 \right) \quad (42)$$

kde: k_e stupeň excentricity ($k_e = 1$ pro dynamickou excentricitu)

p počet pólových dvojic

k_1 konstanta ($k_1 = 0, 2, 4, 6, \dots$)

Q_R počet rotorových drážek ($Q_R = 28$, viz. dokumentace ASM [13])

i řád harmonické (celé číslo)

Tabulka 7: Tabulka vypočtených hodnot frekvencí pro dynamickou excentricitu

řád harmonické	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
konstanta k_1	Δf_{DYN}	Δf_{DYN}	Δf_{DYN}	Δf_{DYN}	Δf_{DYN}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
$k_1 = 0$	720	1416	2111	2806	3502
$k_1 = 2$	820	1516	2211	2906	3602
$k_1 = 4$	920	1616	2311	3006	3702
$k_1 = 6$	1020	1716	2411	3106	3802

5.1.1 Měření prostřednictvím VIBXpertu II

Měření bylo prováděno prostřednictvím mobilního vibrodiagnostického zařízení VIBXpert II od firmy FD Pruftechnik. Na ložiskovém štítu motoru byly pomocí magnetických úchopů umístěny kapacitní snímače v horizontálním a vertikálním směru. Naměřeny jsou vibrace asynchronního motoru ve dvou směrech - radiálním (kanál A), axiálním (kanál B). Naměřenými veličinami jsou zrychlení a rychlost vibrací v obou směrech. Při jmenovitém zatížení a napájení ze tří fázové sítě s kmitočtem 50 Hz výrobce uvádí jmenovité otáčky 1400 ot. /min. Při měření motoru naprázdno, byly jeho otáčky 1490 ot. /min. Lze tak určit základní frekvenci kmitání, kterou uvádí rovnice č. 40.

Určit lze také délku trvání jedné periody kmitání vibrací, která je totožná s periodou otáčení rotoru a její hodnota je důležitá pro vhodnější zobrazení grafů, než při zobrazení celé časového úseku 1000 ms s nepříliš vypovídající hodnotou. V grafech budou tedy zobrazeny tři periody s $T_{\text{vibr}} = 120$ ms neboli tři periody naměřených vibrací. Naměřené signály byly dále analyzovány v programu LabVIEW. Ve vytvořeném programu je po načtení naměřených hodnot vibrací provedena rychlá Fourierova transformace, jejímž výstupem je frekvenční spektrum.

$$T_{\text{vibr}} = T_{\text{rotor}} = \frac{1000}{\frac{n}{60}} = \frac{1000}{\frac{1490}{60}} = 40,27 \text{ ms} \quad (43)$$

Tabulka 8: VIBXpert II naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 1, 2

	Motor 1				Motor 2			
	kanál A		kanál B		kanál A		kanál B	
	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
RMS	1,53	0,96	3,08	1,06	2,17	0,59	5,05	1,22
CF	2,76	2,66	2,54	3,06	2,92	2,98	2,32	2,24

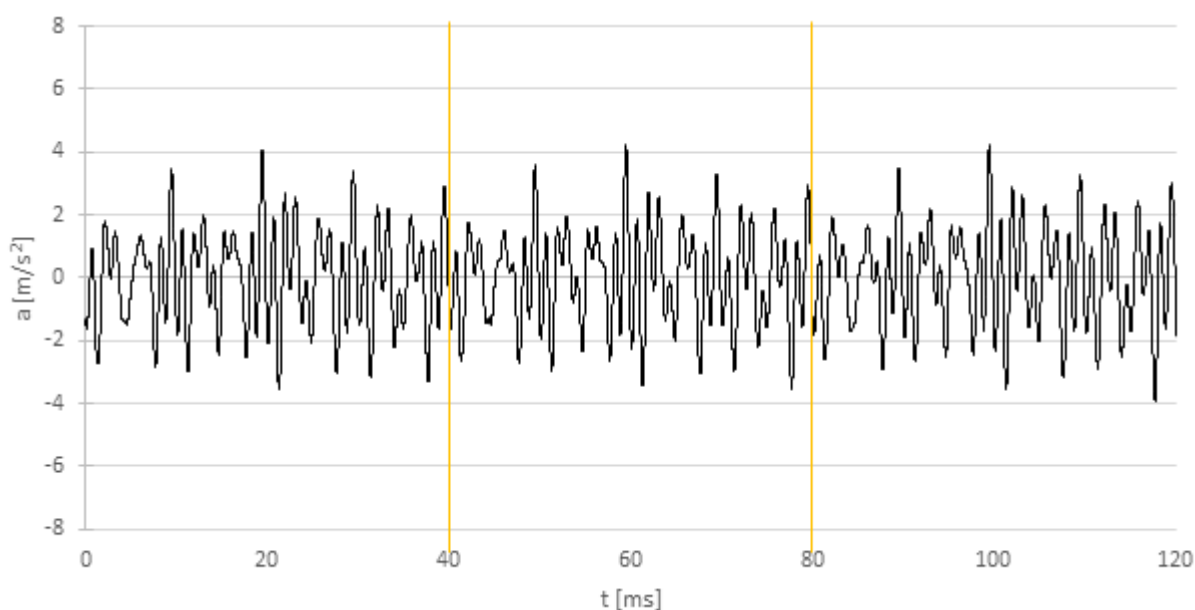
Tabulka 9: VIBXpert II naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 3, 4

	Motor 3				Motor 4			
	kanál A		kanál B		kanál A		kanál B	
	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
RMS	1,38	1,05	3,66	0,99	1,63	2,06	1,78	2,39
CF	2,66	2,27	1,84	2,54	3,24	1,40	3,93	1,53

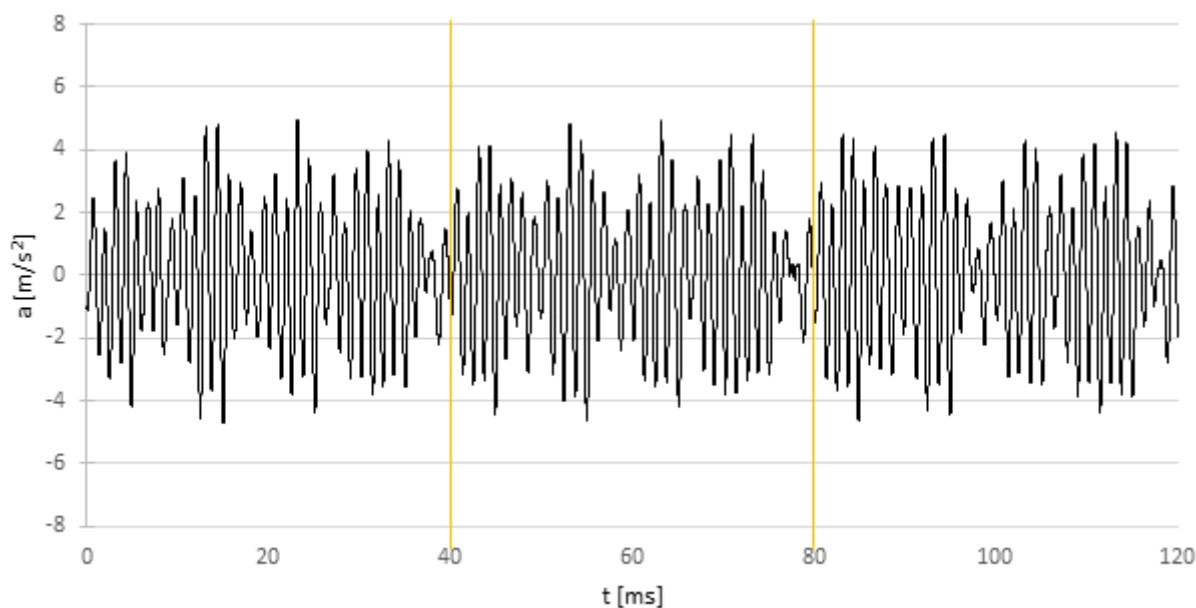
Časové průběhy:

Na prvním grafu vidíme průběh naměřeného signálu zrychlení vibrací motoru č. 1 v radiálním směru (kanál A). Z prvotního pohledu je zřejmé, že průběh má jistou periodičnost a efektivní hodnota zrychlení vibrací je $1,53 \text{ m/s}^2$ (Tabulka 9). Dále je vidět zašumění tohoto signálu, což je způsobeno vlivem vyšších frekvencí.

Druhý graf ukazuje zrychlení vibrací motoru č. 2 ve stejném směru, jako v předchozím případě. Tento motor má stejné štítkové hodnoty, jako motor č. 1. Rozdíl však je v definované výrobní vadě. Motor č. 2 má oproti motoru č. 1 vyšší dynamickou excentricitu a jejich statická excentricita je stejná (Tabulka 2). Lze tuto závadu vidět i na daném časovém průběhu. Pro druhý motor obsahuje signál větší šum, jehož původem může být nastávající závada na ložiskách. Efektivní hodnota je větší, její velikost je $2,17 \text{ m/s}^2$.



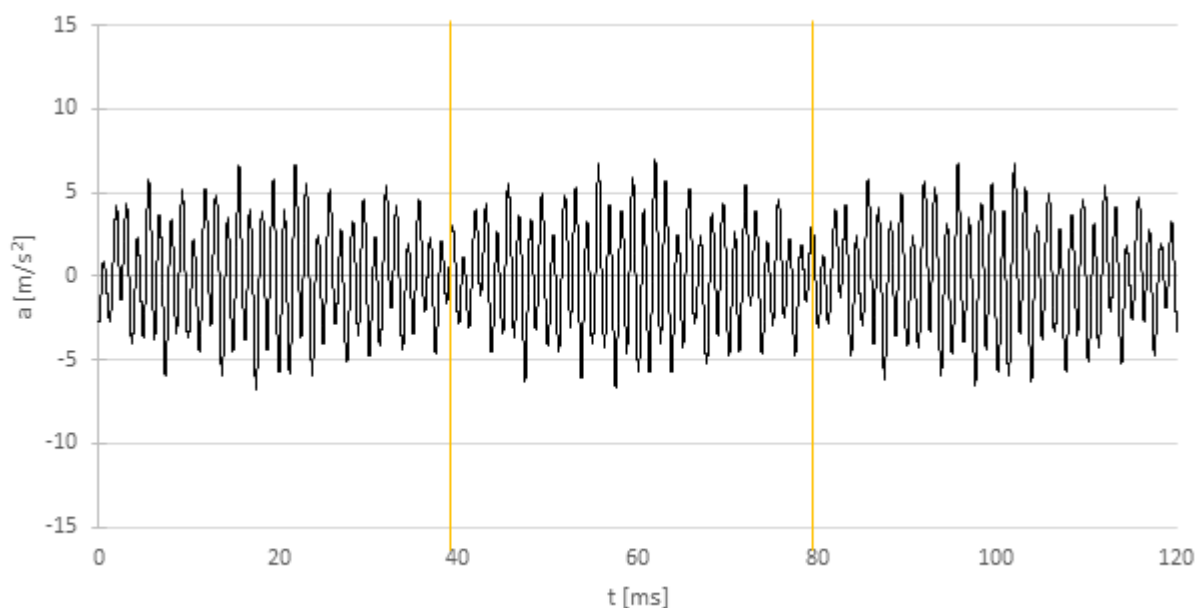
Graf 1: Motor 1, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru



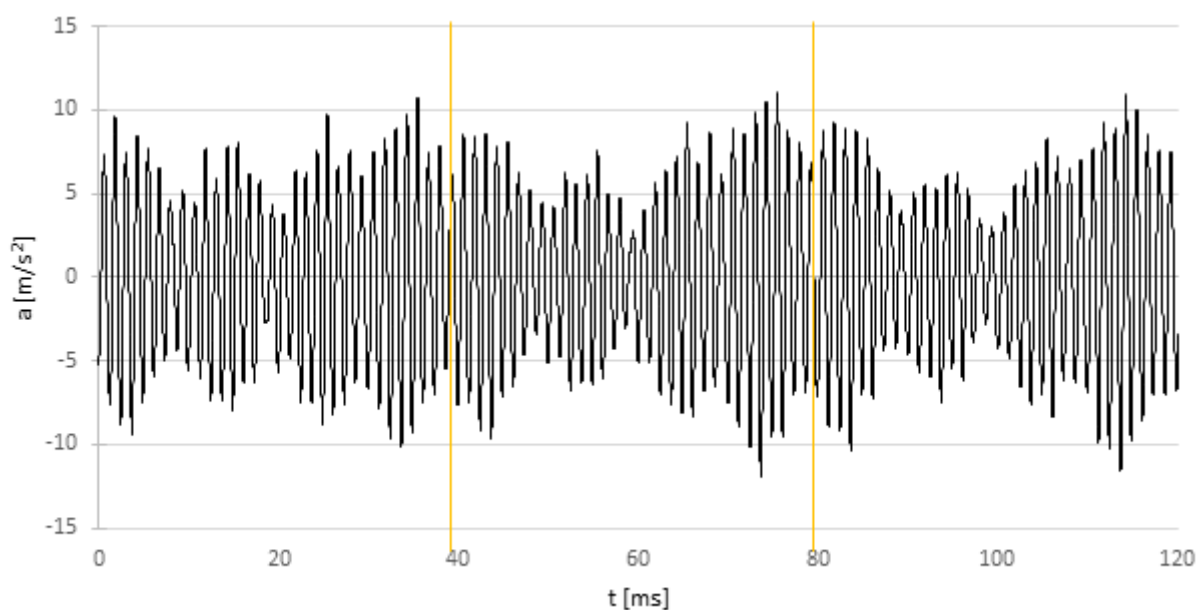
Graf 2: Motor 2, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru

Dále zde máme průběh zrychlení vibrací na stejných motorech, avšak ve směru axiálním (kanál B). Opět vidíme periodický průběh s efektivní hodnotou $3,08 \text{ m/s}^2$ v případě prvního motoru (Graf 3). Oproti kanálu A (Graf 1) se průběh změnil, je zde patrné zvětšení frekvenčního šumu a zvýšení efektivní hodnoty na téměř dvojnásobek.

Zrychlení v axiálním směru druhého motoru (Graf 4) na první pohled vypadá vskutku podobně v porovnání se zrychlením v radiálním směru. Je zde vidět, že zrychlení probíhá na vyšších frekvencích. Rozdíly mezi průběhy jsou způsobeny charakterem zdrojů vibrací. Některé zdroje působí vibrace zejména v axiálním směru nebo naopak. V porovnání s motorem č. 1 se zvýšila efektivní hodnota zrychlení na $5,05 \text{ m/s}^2$.



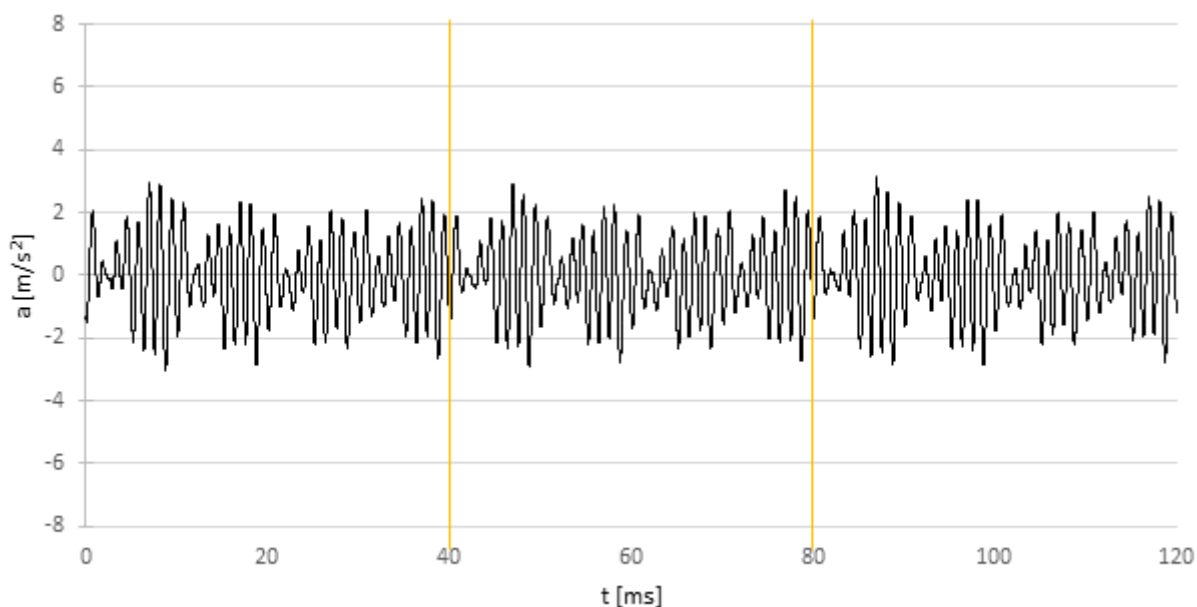
Graf 3: Motor 1, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru



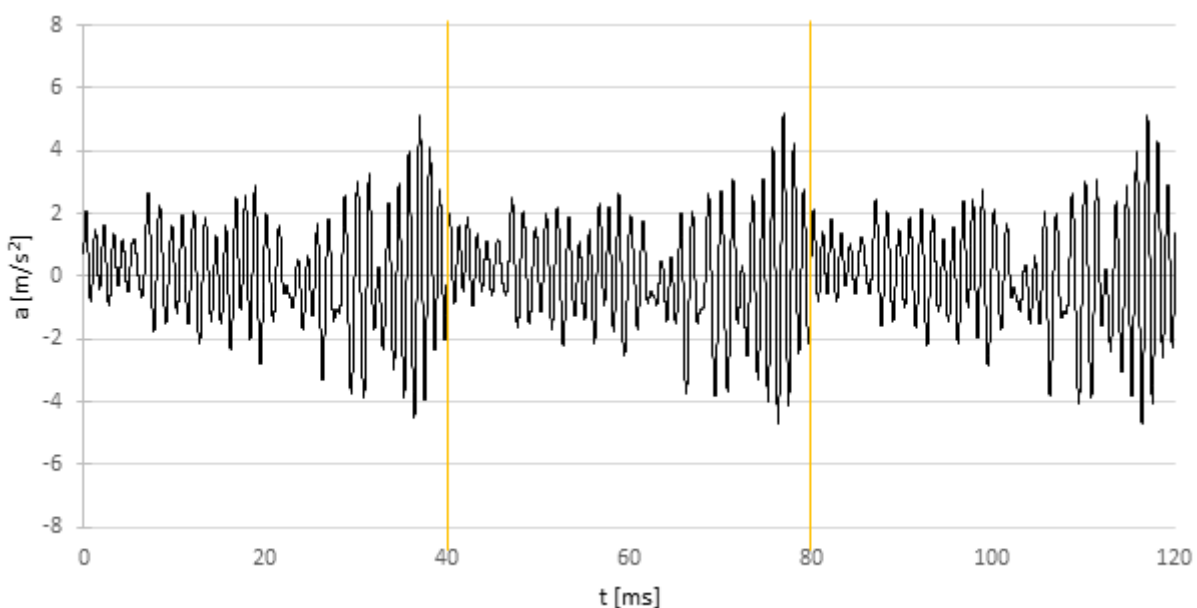
Graf 4: Motor 2, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru

Oproti předchozím motorům má motor č. 3 definovanou vyšší statickou excentricitu a nižší dynamickou excentricitu. V porovnání průběhů zrychlení s předchozími motory, nedochází k výrazným změnám. Naměřené signály mají určitou podobnost, kdy se liší zejména ve velikosti efektivní hodnoty a frekvence kmitání. Motor č. 4 má stejnou statickou excentricitu, jako motor č. 3, avšak dynamická excentricita je vyšší (stejná jako u motoru č. 2) (Tabulka 2).

Při pohledu na průběhy zrychlení lze vidět, že opět dochází ke zrychlení vibrací na vyšších frekvencích. V případě třetího motoru (Graf 5) je efektivní hodnota zrychlení $1,38 \text{ m/s}^2$. Efektivní hodnota zrychlení motoru č. 4 (Graf 6) není výrazně vyšší $1,63 \text{ m/s}^2$. Signály se ve velké části zhruba přibližují stejnému průběhu, avšak u motoru č. 4 je vidět, že dochází na konci každé periody ke zvýšení amplitudy.



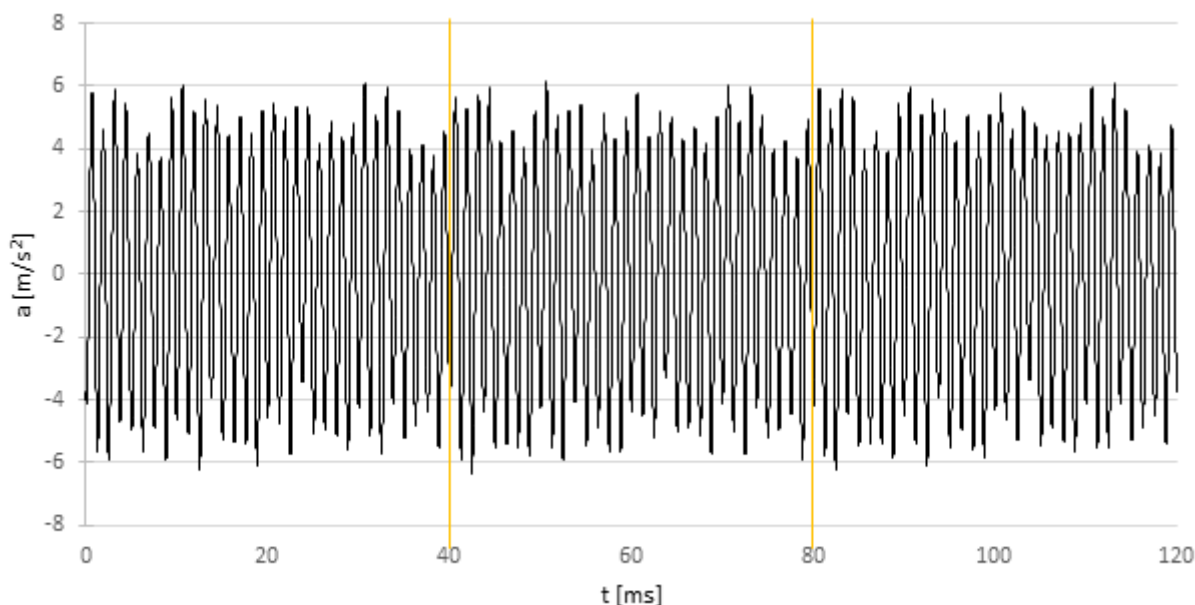
Graf 5: Motor 3, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru



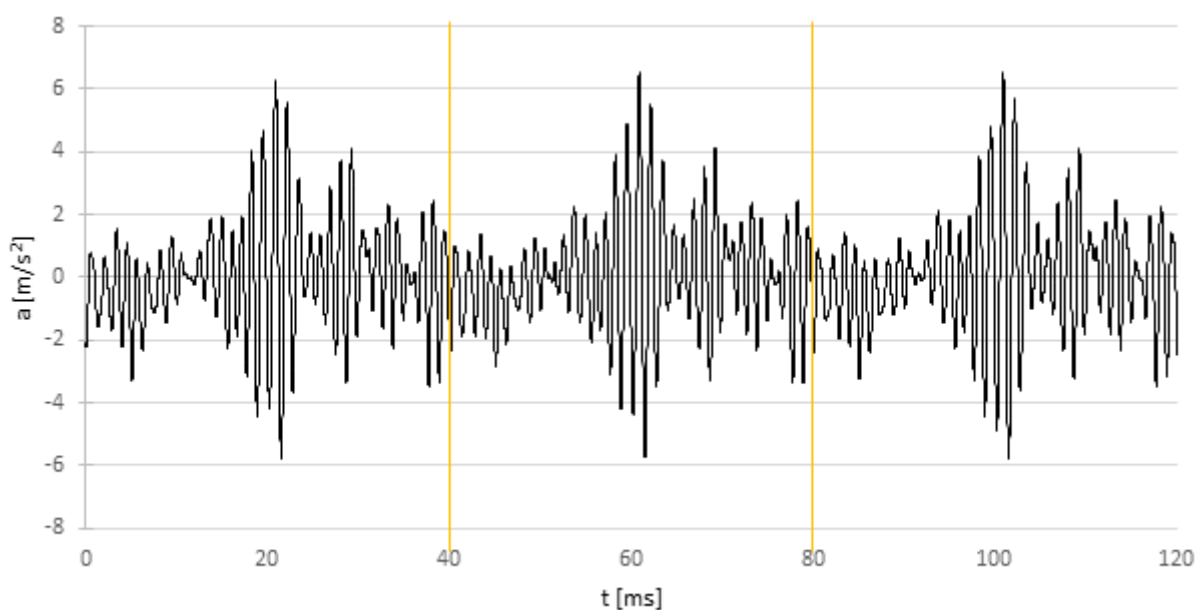
Graf 6: Motor 4, kanál A - Průběh tří period zrychlení vibrací v radiálním směru

Při pohledu na průběhy zrychlení vibrací v axiálním směru, pro motory č. 3 (Graf 7) a č. 4 (Graf 8) je vidět odlišnost těchto průběhů. Signály obou motorů jsou periodické. Jednu periodu tj. 40 ms vyznačují svislé oranžové čáry, jako v předchozích případech. Efektivní hodnota zrychlení vibrací pro motor č. 3 je $3,66 \text{ m/s}^2$. Tato hodnota je oproti efektivní hodnotě zrychlení vibrací posledního motoru výrazně vyšší. Motor č. 4 má efektivní hodnotu zrychlení $1,78 \text{ m/s}^2$.

Je možné předpokládat, že frekvenční spektrum třetího motoru v axiálním směru nebude obsahovat velké množství frekvenčních špiček, což lze vyvodit z naměřeného časového průběhu. Nedochází k tak výrazným změnám, jakož tomu je u motoru č. 4. V jehož frekvenčním spektru je obsaženo větší množství frekvenčních složek.



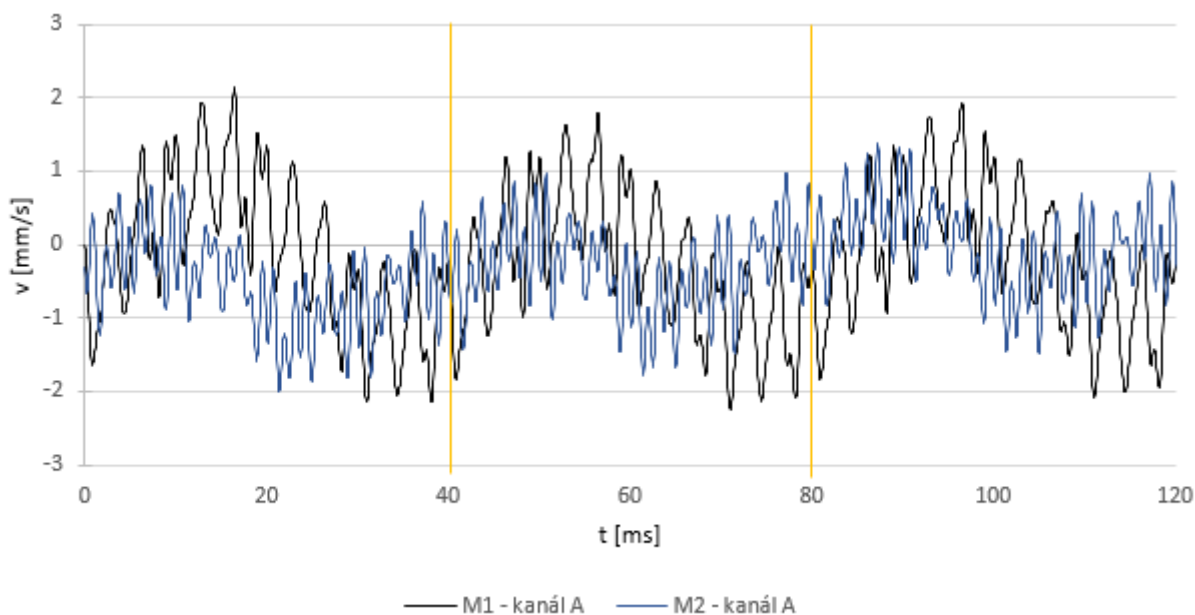
Graf 7: Motor 3, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru



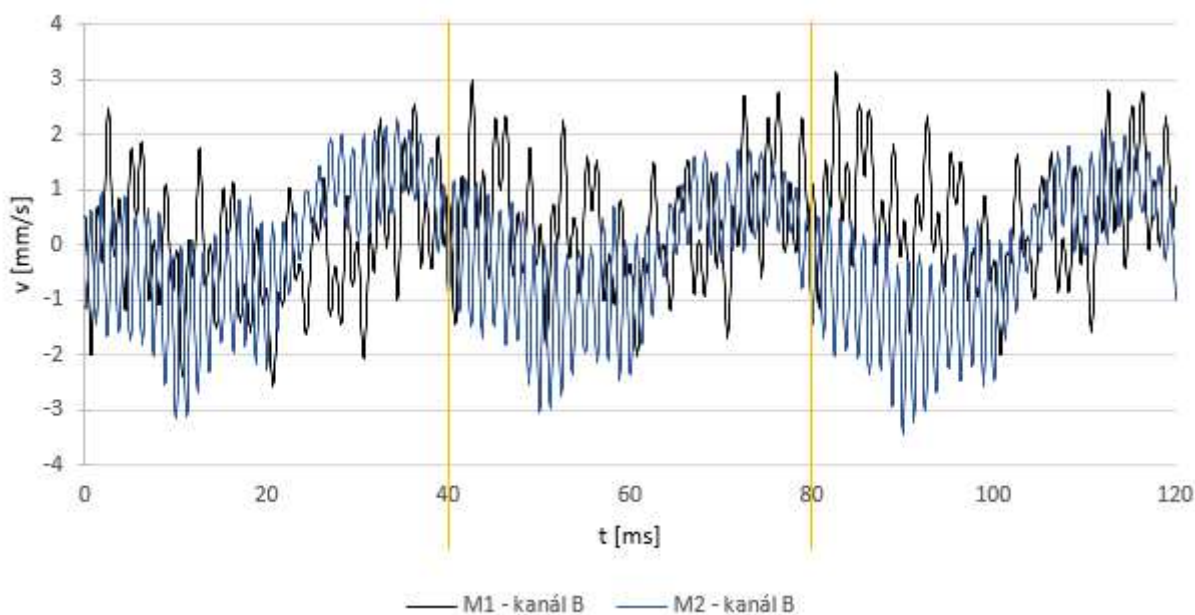
Graf 8: Motor 4, kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru

Naměřené průběhy rychlostí vibrací se od průběhu zrychlení výrazně liší. Lze snadno vidět, že k rychlosti vibrací dochází na nižších frekvencích. Signál není zarušený jako v případě zrychlení a lze vidět i základní sinusový signál, který spolu s modulovanými signály od dalších frekvencí tvoří výsledný průběh.

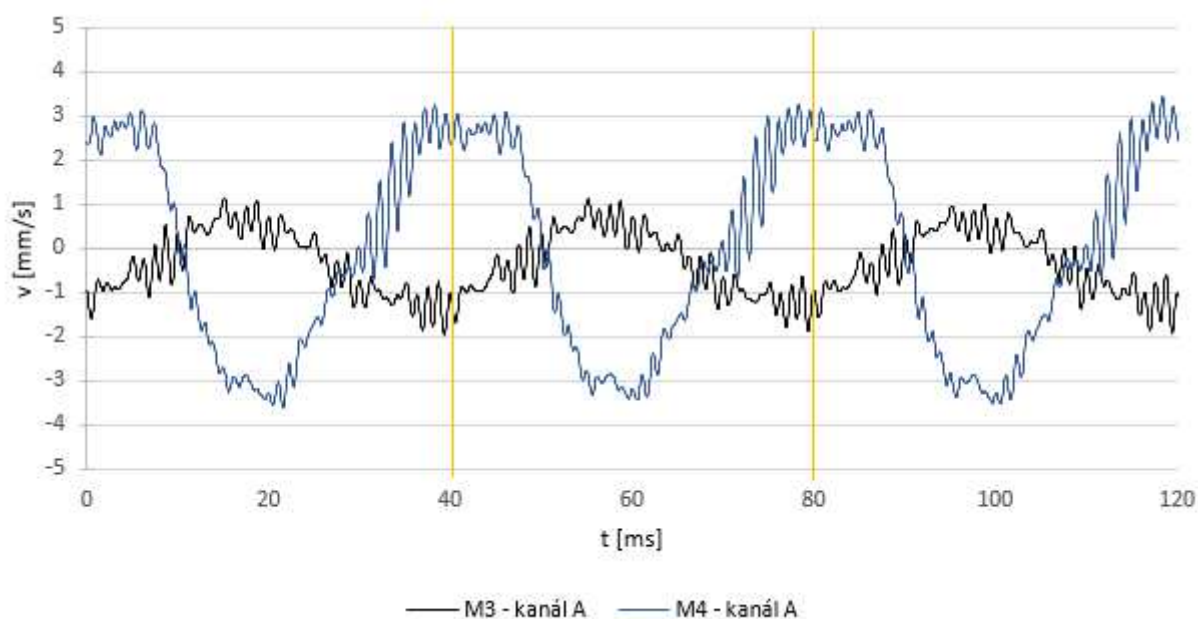
Na následujících grafech je zobrazeno porovnání průběhů rychlosti vibrací jednotlivých motorů v radiálním a axiálním směru. Liší se zejména ve velikosti efektivních hodnot rychlosti vibrací, které jsou uvedeny v tabulce 9. Rovněž průběh vibrací závisí na působení vyšších frekvencí.



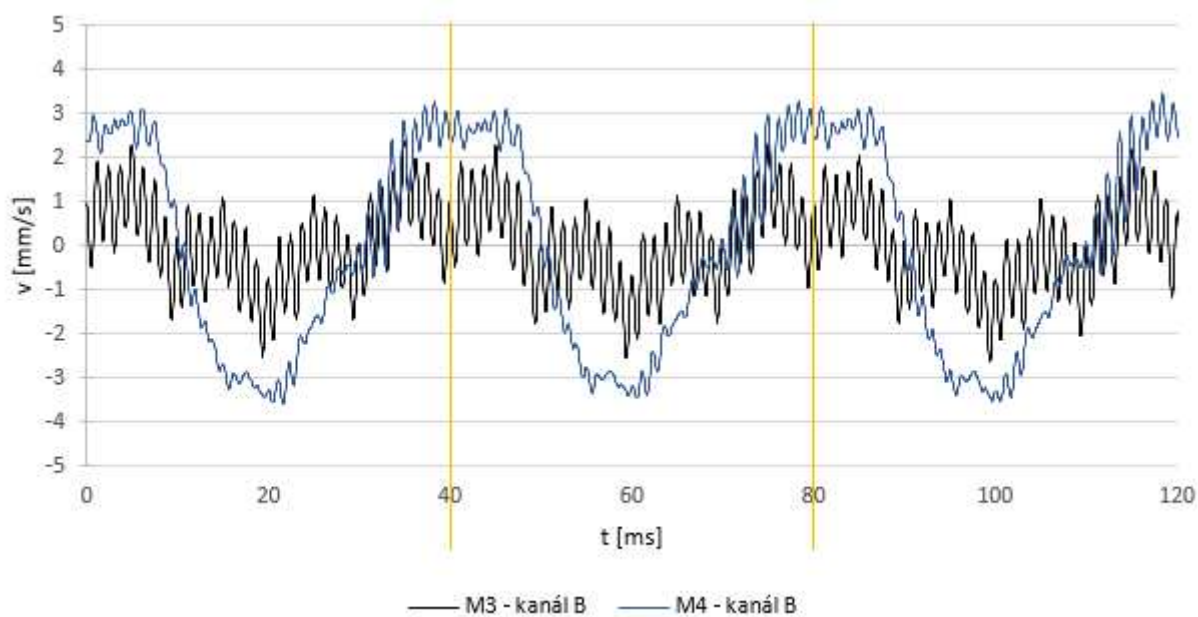
Graf 9: Motor 1,2 kanál A - Průběh tří period rychlosti vibrací v radiálním směru



Graf 10: Motor 1,2 kanál B - Průběh tří period rychlosti vibrací v axiálním směru

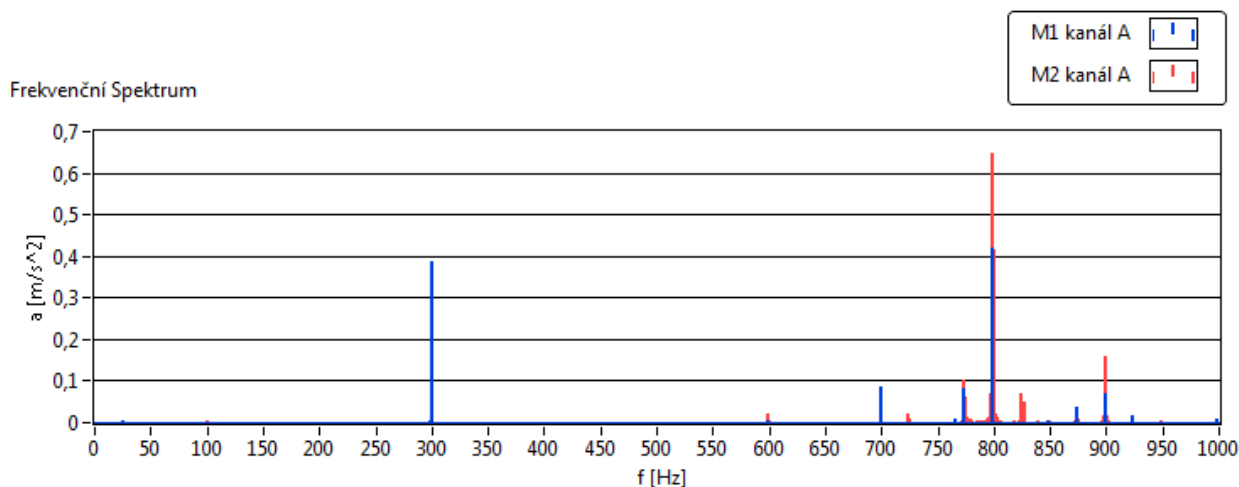


Graf 11: Motor 3,4 kanál A - Průběh tří period rychlosti vibrací v radiálním směru



Graf 12: Motor 3, 4 kanál B - Průběh tří period rychlosti vibrací v axiálním směru

Frekvenční spektra:



Graf 13: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál A (radiální směr)

Tabulka 10: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 1, kanál A

f [Hz]	25	300	699	766	799	899	924
a [m/s ²]	0,0048	0,3874	0,0857	0,0082	0,4179	0,0709	0,0175

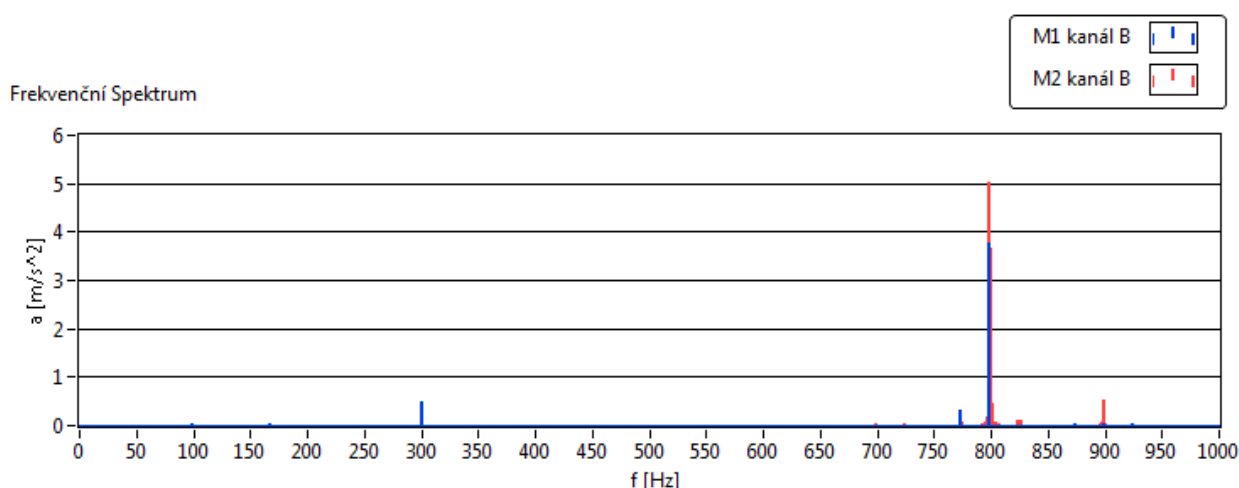
Tabulka 11: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 2, kanál A

f [Hz]	25	300	774	775	776	799	800
a [m/s ²]	0,0012	0,1096	0,1031	0,0612	0,0114	0,6458	0,4157

Z hlediska hodnocení naměřených vibrací patří frekvenční spektra mezi diagnózy s nejvyšší vypovídající hodnotou. Výhodou je přesné určení frekvencí, na kterých probíhají vibrace již pouhým okem. Graf 13 zobrazuje frekvenční spektrum zrychlení vibrací motoru č. 1, 2 v radiálním směru. Po dobu 1000 ms bylo zařízením naměřeno přes 160 000 hodnot, avšak spektrum obsahuje pouze frekvence do 1 kHz, protože vibrace na vyšších frekvencích téměř nevznikají anebo nemají velkou hodnotu. Jedná se o spektrum výkonové, tudíž hodnoty zrychlení vibrací nejsou velké, protože motor byl měřen ve stavu naprázdno.

V porovnání motorů č. 1 a 2 můžeme vidět, že k vibracím dochází na podobných frekvencích a liší se velikostí amplitudy zrychlení. Základní frekvencí vibrací je 25 Hz a ostatní další frekvence jsou jejími násobky. Například frekvence 300 Hz je dvanáctá harmonická, tedy dvanácti násobkem základní frekvence.

Motor č. 1 v radiálním směru vykazoval největší špičky zrychlení vibrací na frekvenci 799 Hz, kdežto motor č. 2 v tomtéž směru měl největší špičku na stejné frekvenci, avšak dosahovala vyšší hodnoty než u prvního motoru. Hodnoty zrychlení na jednotlivých frekvencích jsou uvedeny v tabulkách 10 a 11.



Graf 14: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál B (axiální směr)

Tabulka 12: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 1, kanál B

f [Hz]	25	300	774	799
a [m/s^2]	0,0020	0,4845	0,3011	3,7534

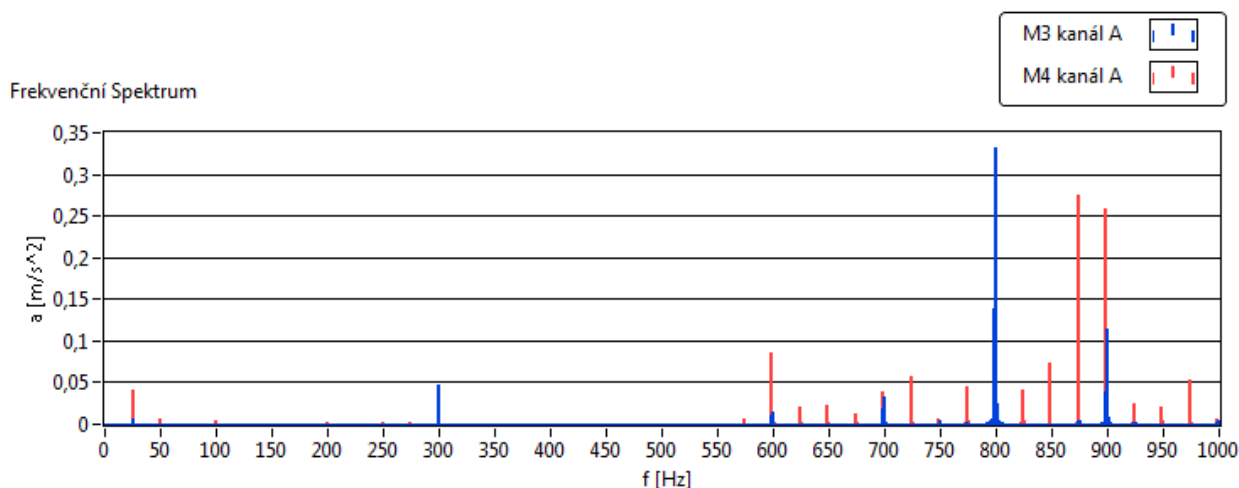
Tabulka 13: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 2, kanál B

f [Hz]	25	300	798	799	800	801	802	899	900
a [m/s^2]	0,0092	0,0353	0,4936	5,0236	3,6559	0,4706	0,1770	0,5220	0,4317

Dále zde máme porovnání stejných motorů jako v předchozím případě (motor č. 1, 2), ale ve směru axiálním. V porovnání frekvenčních spekter pro kanál A a kanál B těchto motorů, je vidět, že k vibracím dochází zejména na frekvencích 300 Hz a okolo frekvence 800 Hz. Vibrace ve směru axiálním obsahují méně frekvenčních špiček, avšak došlo k několikanásobnému nárůstu amplitudy zrychlení vibrací.

Motor č. 1 v axiálním směru vykazoval nejvyšší vibrace na frekvenci 799 Hz a to amplitudu zrychlení $3,7534 \text{ m/s}^2$. Na frekvenci 300 Hz bylo hodnota zrychlení $0,4845 \text{ m/s}^2$. Oproti směru radiálním je zde výrazné navýšení. Je tedy zřejmé, že vibrace působí větší mírou ve směru axiálním.

Frekvenční spektrum druhého motoru v axiálním směru má opět nejvyšší hodnoty zrychlení na frekvencích 300 Hz a 800 Hz. Nejvyšší špička zrychlení vibrací byla na 799 Hz a to $5,0236 \text{ m/s}^2$. Všechny ostatní hodnoty zrychlení jsou uvedeny v tabulkách 12, 13.



Graf 15: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál A (radiální směr)

Tabulka 14: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 3, kanál A

f [Hz]	25	300	799	800	900
a [m/s ²]	0,0051	0,0464	0,1392	0,3320	0,1135

Tabulka 15: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 4, kanál A

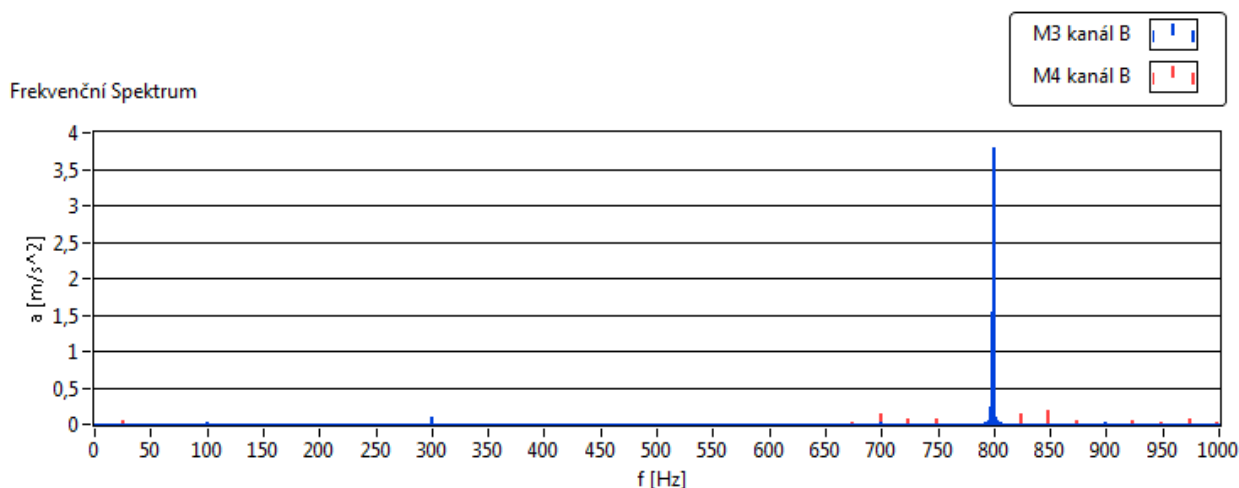
f [Hz]	25	300	599	724	874	899
a [m/s ²]	0,0401	0,0052	0,0846	0,0577	0,2753	0,2576

Další sérii porovnávaných frekvenčních spekter jsou naměřená výkonová spektra pro motory č. 3 a 4. V prvním případě byly porovnány spektra obou motorů naměřených v radiálním směru. Oproti motorům č. 1, 2 lze vidět větší množství frekvenčních špiček. Vibrace se tedy projevují na větším množství frekvenčních složek.

Frekvenční spektrum motoru č. 3 v radiálním směru vykazovalo zrychlení vibrací zejména na frekvencích v rozmezí 800 Hz až 900 Hz. Nejvyšší špička zrychlení byla na frekvenci 800 Hz, která je 32-násobkem základní frekvence 25 Hz. Hodnota byla 0,3320 m/s².

Motor č. 4 taktéž v radiálním směru vykazoval více frekvenčních špiček, což je vidět na grafu frekvenčního spektra (Graf 15). Lze vidět, že se nepatrně projevují vibrace na základní frekvenci otáčení rotoru 25 Hz, jejich hodnota je však malá a to 0,0401 m/s². Amplitudy zrychlení ostatních špiček nemají závratné hodnoty. Za zmínku stojí špičky zrychlení vibrací na frekvencích 874 Hz a 899 Hz.

V porovnání hodnot zrychlení pro motory č. 3, 4 s motory č. 1, 2 došlo ke snížení nejvyšších amplitud. Ostatní hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 14 a 15.



Graf 16: FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál B (axiální směr))

Tabulka 16: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 3, kanál B

f [Hz]	25	300	798	799	800	801
a [m/s ²]	0,0035	0,0893	0,2223	1,5417	3,7974	0,2856

Tabulka 17: VIBXpert II nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích – Motor 4, kanál B

f [Hz]	25	300	699	799	824	849
a [m/s ²]	0,0538	0,0051	0,1503	0,4069	0,1371	0,1832

Poslední frekvenční spektra naměřených průběhů zrychlení vibrací VIBXpert II jsou pro motory č. 3 a 4 v axiálním směru. Při prvním pohledu na toto frekvenční spektrum je zřejmé, že dochází k jedné velké špičce zrychlení na frekvenci okolo 800 Hz. Vlivem této hodnoty zrychlení jsou další malé špičky zrychlení potlačeny vlivem rozsahu daného spektra. Nemají tedy dostatečně velkou hodnotu zrychlení, aby byly přehledně viděny ve frekvenčním spektru. Proto více vypovídající o daném porovnání spekter motorů 3 a 4 v axiálním směru jsou tabulky 16 a 17 nejvyšších amplitud zrychlení pro jednotlivé motory na odpovídajících frekvencích.

Motor č. 3 v axiálním směru vykazoval nejvyšší hodnoty zrychlení 3,7974 m/s² na frekvenci 800 Hz a v okolí této hodnoty jsou vyšší hodnoty zrychlení vibrací. Na ostatních frekvencích jsou amplitudy zrychlení výrazně menší.

Frekvenční spektrum motoru č. 4 v axiálním směru má nejvyšší hodnotu zrychlení 0,4069 m/s² na frekvenci 799 Hz. Ostatní frekvenční špičky jsou s menšími hodnotami zrychlení, avšak tyto hodnoty jsou obsaženy v tabulce 17.

5.1.2 Měření prostřednictvím DAQ asistentu

Druhá část měření byla zaměřena více na prostředí programu LabVIEW. Měření vibrací probíhalo prostřednictvím měřicího zařízení od firmy National Instruments – DAQ asistentu model NI PXIe – 1082. Toto multifunkční zařízení v sobě obsahuje i operační systém Windows, ve kterém je instalován program LabVIEW. Do slotu NI PXIe – 4492 byly připojeny analogové vstupy. Na vstup č. 8 a č. 9 byly připojeny snímače zrychlení – akcelerometry.

V programu LabVIEW byl následně vybrán blok DAQ assistant, ve kterém bylo nutné nastavit parametry obou snímačů, které jsou uvedeny v tabulce 18. Program se oproti zpracování naměřených dat z VIBXpert II liší. Neobsahuje načtení již změřených hodnot, avšak hodnoty jsou přímo zobrazovány z měřicího zařízení pomocí grafických prvků ve Front panelu.

Tabulka 18: Kalibrační data akcelerometrů

Akcelerometr č. 8		Akcelerometr č. 9	
Model	352C03	Model	352C33
Sériové číslo	LW155546	Sériové číslo	LW161611
Citlivost	10,12 mV/g	Citlivost	101,7 mV/g
Úroveň zkreslení	10,9 V	Úroveň zkreslení	10,9 VDC

Tabulka 19: DAQ naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 1, 2

	Motor 1		Motor 2	
	kanál A	kanál B	kanál A	kanál B
	a [m/s ²]	a [m/s ²]	a [m/s ²]	a [m/s ²]
RMS	1,56	1,78	1,83	2,03
CF	2,88	3,26	3,03	2,82

Tabulka 20: DAQ naměřené efektivní hodnoty zrychlení vibrací a Crest faktorů pro motory č. 3, 4

	Motor 3		Motor 4	
	kanál A	kanál B	kanál A	kanál B
	a [m/s ²]	a [m/s ²]	a [m/s ²]	a [m/s ²]
RMS	1,47	1,64	1,89	1,61
CF	3,32	2,98	4,18	4,22

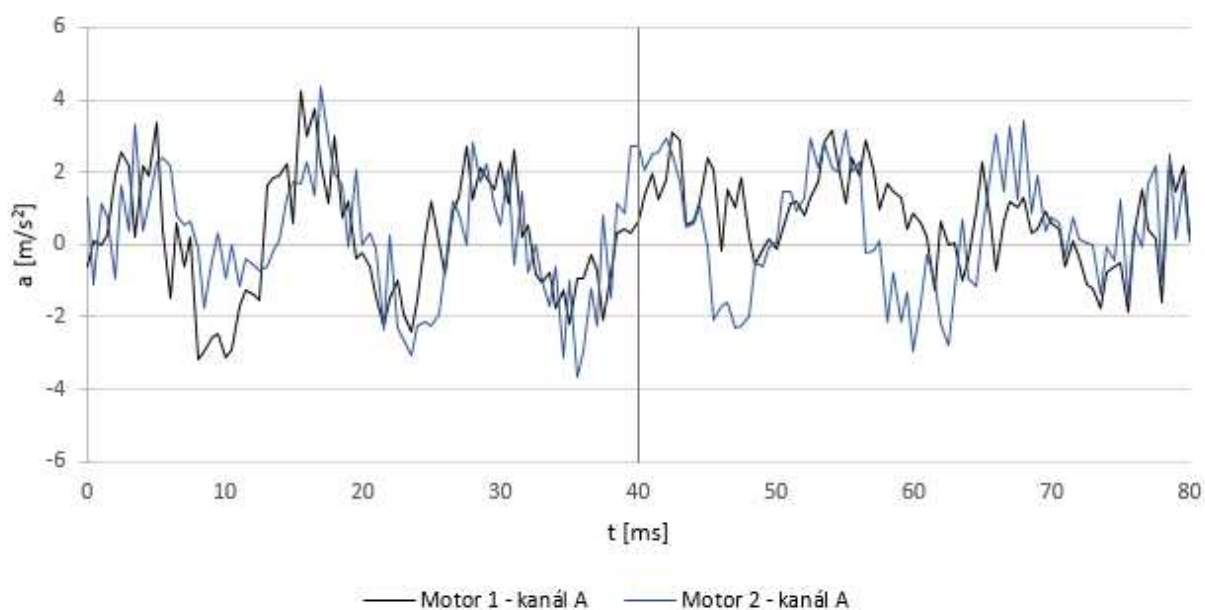
Ve výše uvedených tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty efektivních hodnot a hodnot Crest faktoru získaných při měření s DAQ asistentem. V porovnání s naměřenými hodnotami VIBXpert se hodnoty liší pouze řádově v desetínách. Největší odchylka byla zaznamenána u motoru č. 4, kde Crest faktor překročil hodnotu 4. Z hlediska hodnocení vibrací je známo, že dobrý stav zařízení platí pro hodnoty Crest faktoru v rozmezí $CF = 2 \div 4$.

Rozdíly mezi hodnotami naměřenými oběma způsoby mohou být zejména ve vzorkování. Průmyslové zařízení VIBXpert naměřilo více než 140 000 vzorků, kdežto DAQ asistent – laboratorní stanice naměřila 2000 vzorků.

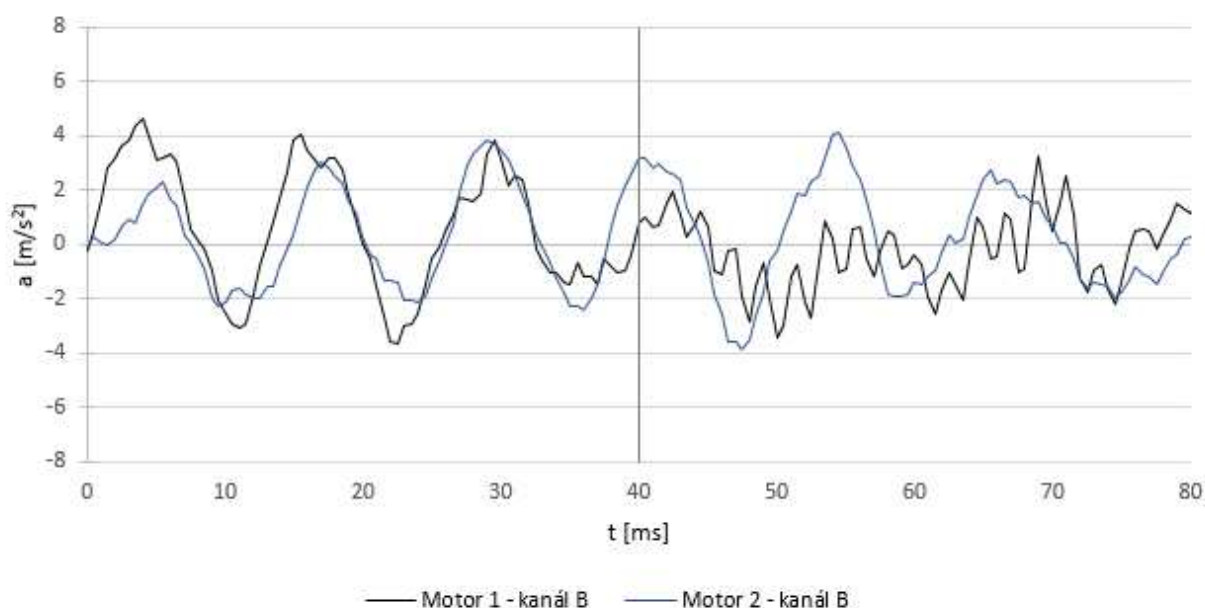
Časové průběhy:

V porovnání časových průběhů naměřených pomocí DAQ asistentu a VIBXpertu II je zřejmé, že druhé zařízení obsahuje větší množství naměřených hodnot. Prostřednictvím DAQ asistentu byl naměřen časový průběh s 2000 hodnotami, proto jsou ve výsledku signály více čitelné při zobrazení dvou period.

Na první sérii grafů jsou porovnávány signály z motorů č. 1, 2 ve směru radiálním (Graf 17) a směru axiálním (Graf 18). V obou směrech vidíme, že průběhy motorů mají jistou podobnost a jejich efektivní hodnoty zrychlení vibrací se liší pouze o desetiny. Efektivní hodnoty pro oba směry jsou uvedeny v tabulce 19 a 20.



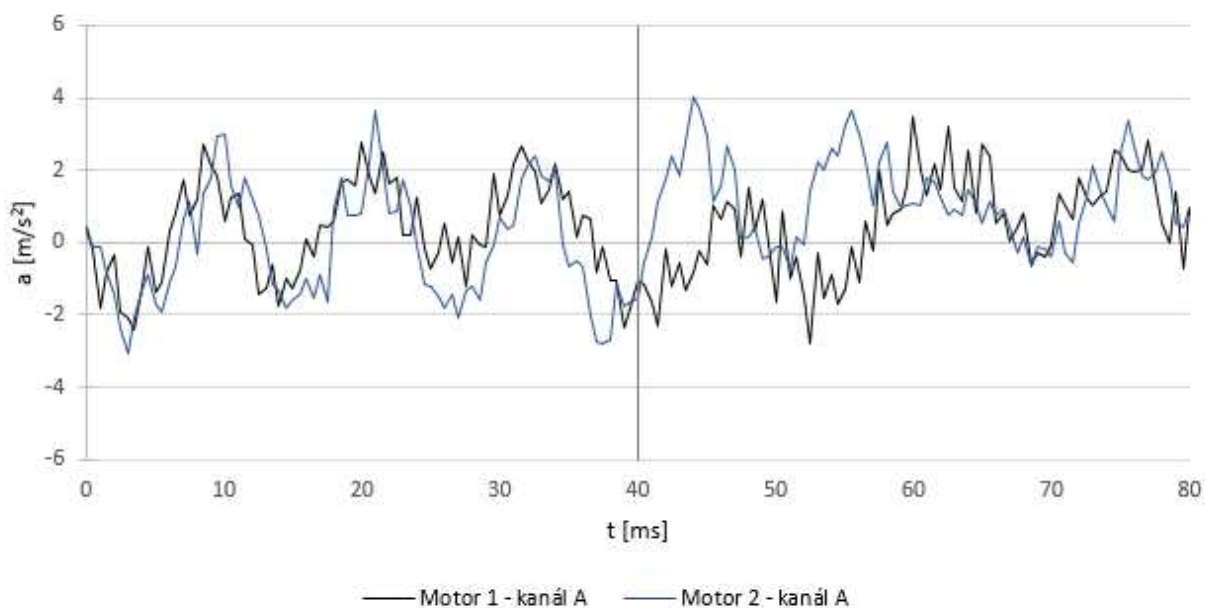
Graf 17: Motor 1,2 kanál A - Průběh dvou period zrychlení vibrací v radiálním směru – DAQ



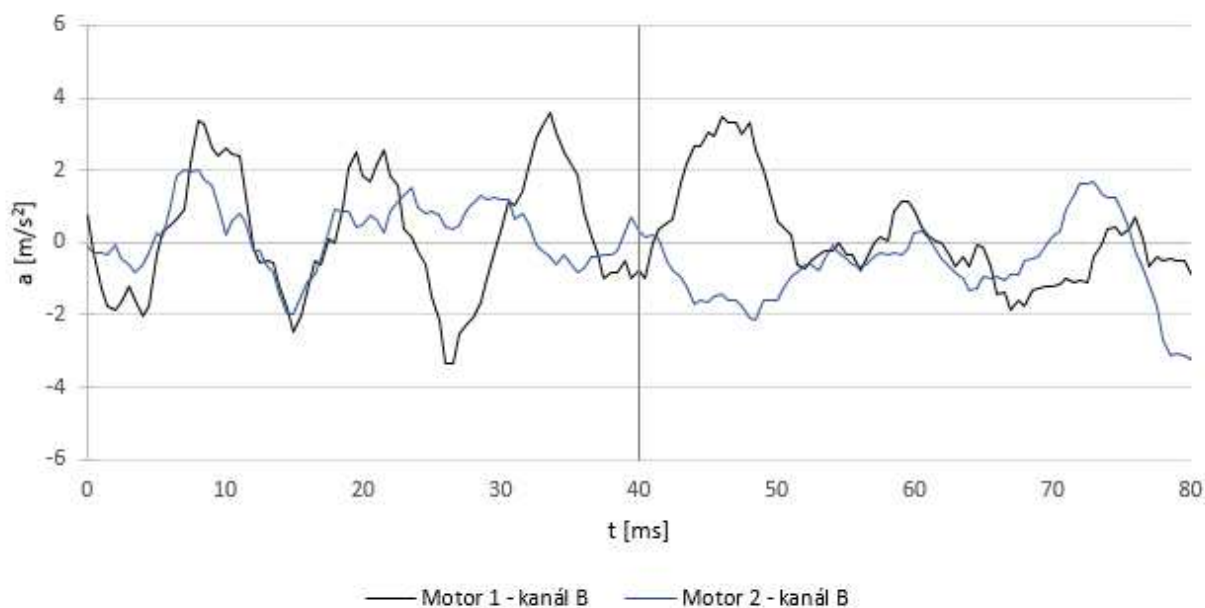
Graf 18: Motor 1,2 kanál B - Průběh dvou period zrychlení vibrací v axiálním směru – DAQ

Další porovnávané časové průběhy změřené DAQ asistentem jsou pro motory č. 3 a 4. Jedná se o průběhy zrychlení vibrací ve směru radiálním (Graf 19) a axiálním (Graf 20). U motorů č. 3 a 4 v radiálním směru jsou vibrace více zašuměné než ve směru axiálním. Je zřejmé, že ve směru radiálním je přítomnost vyšších frekvencí větší než ve směru axiálním. Působení konkrétních frekvencí bude více zřetelné na frekvenčních spektrech pro oba signály.

Efektivní hodnoty zrychlení vibrací pro oba kanály jsou uvedeny v tabulkách 19, 20. V porovnání s naměřenými efektivními hodnotami z VIBXpertu (Tabulka 8) (Tabulka 9) lze vidět, že hodnoty se liší řádově o desetiny. U motoru č. 4 ve směru axiálním se efektivní hodnoty zrychlení liší více. Naměřená efektivní hodnota zrychlení VIBXpert je více než dvojnásobná, oproti změřené efektivní hodnotě zrychlení pomocí DAQ asistenta. Tím se však liší i vypočtené hodnoty Crest faktoru pro daný směr.

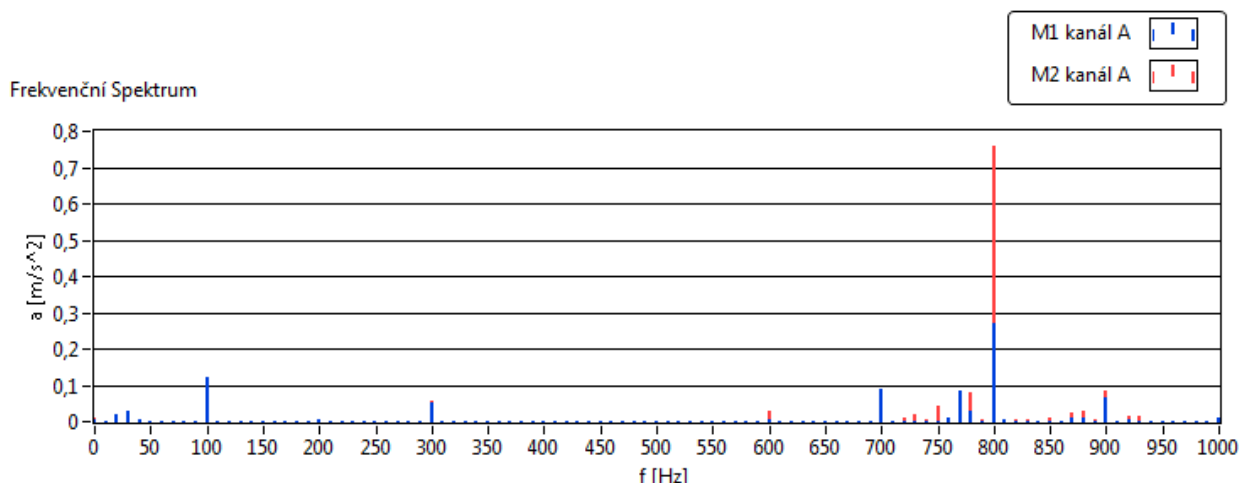


Graf 19: Motor 3,4 kanál A - Průběh dvou period zrychlení vibrací v radiálním směru – DAQ



Graf 20: Motor 3,4 kanál B - Průběh tří period zrychlení vibrací v axiálním směru – DAQ

Frekvenční spektra:



Graf 21: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál A (radiální směr)

Tabulka 21: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 1, kanál A

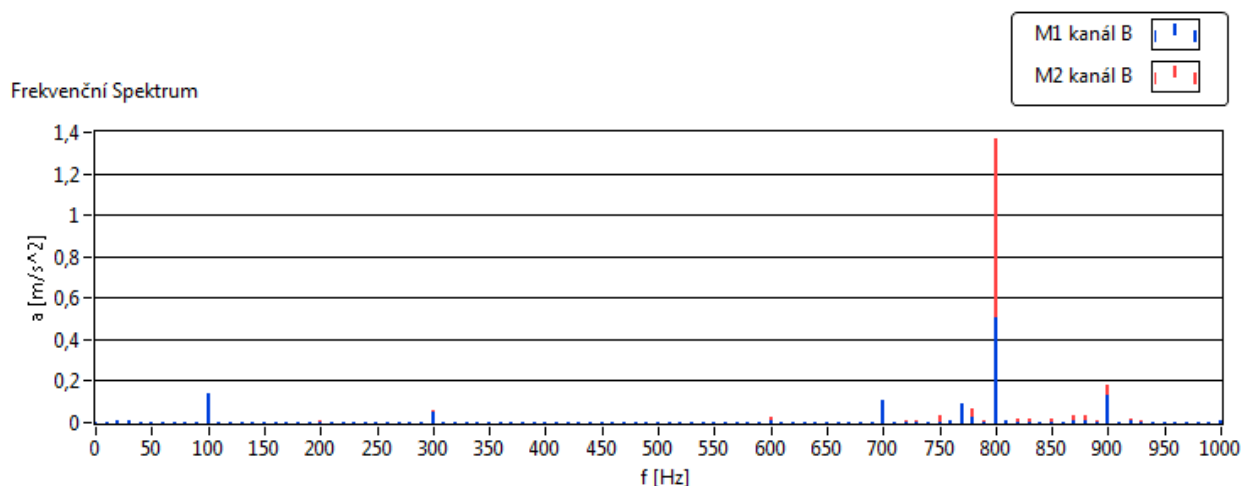
f [Hz]	30	100	300	700	800	900
a [m/s ²]	0,0260	0,1196	0,0520	0,0871	0,2700	0,0635

Tabulka 22: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 2, kanál A

f [Hz]	30	100	300	700	800	900
a [m/s ²]	0,0168	0,0577	0,0566	0,0417	0,7600	0,0836

Stejně jako časové signály z měření s DAQ asistentem, jsou porovnány i jednotlivá frekvenční spektra. V prvním případě jsou srovnány výkonová spektra pro motory č. 1, 2 (Graf 21). Vidíme zde, že dochází ke zrychlení vibrací i na nižších frekvencích, jmenovitě 30 Hz, 100 Hz a 300 Hz. Tyto frekvence v porovnání s frekvenčním spektrem z měření VIBXpert nebyly tak výrazné a ve spektru se více neprojevovali. K největšímu zrychlení však dochází na frekvencích okolo 800 Hz, což odpovídá měření s VIBXpert

Jedná-li se o radiální směr pro motor č. 1 (Tabulka 21), k největším zrychlením vibrací dochází na frekvenci 800 Hz s hodnotou 0,27 m/s². K dalším projevům vibrací dochází zejména na frekvencích 100 Hz, 700 Hz a 900 Hz, avšak hodnoty zrychlení vibrací jsou výrazně nižší. U motoru č. 2 (Tabulka 22) je tomu zrovna tak. Největší špička zrychlení je na frekvenci 800 Hz a to 0,76 m/s². V porovnání s prvním motorem je tato hodnota výrazně vyšší. To odpovídá definovaným výrobním vadám těchto motorů, jelikož motor č. 2 má definovanou větší dynamickou excentricitu.



Graf 22: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 1,2 - kanál B (axiální směr)

Tabulka 23: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 1, kanál B

$f \text{ [Hz]}$	30	100	300	700	800	900
$a \text{ [m/s}^2\text{]}$	0,0054	0,1356	0,0448	0,1083	0,5061	0,1341

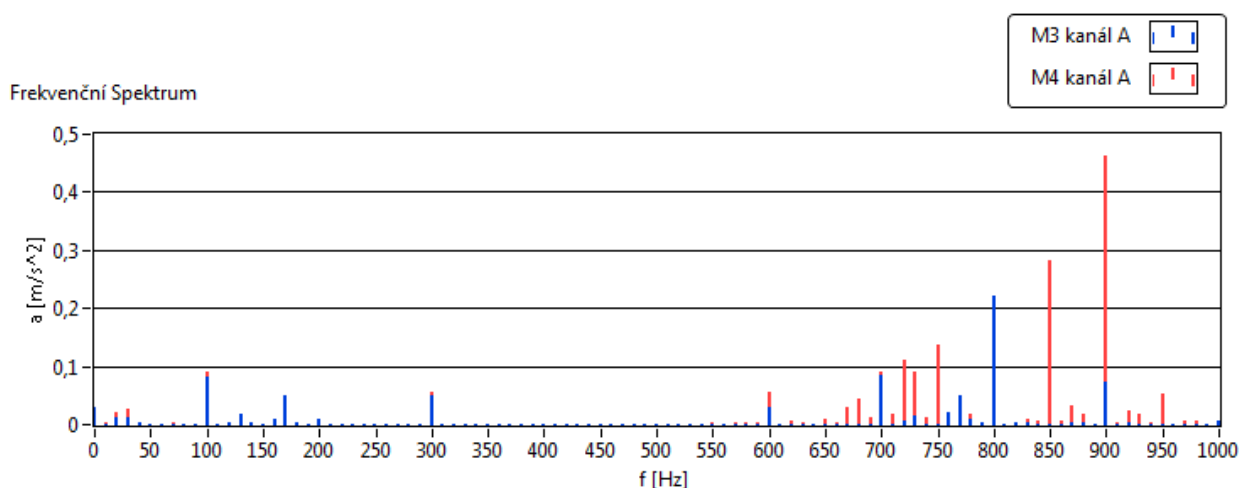
Tabulka 24: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 2, kanál B

$f \text{ [Hz]}$	30	100	300	700	800	900
$a \text{ [m/s}^2\text{]}$	0,0049	0,0558	0,0532	0,0425	1,3645	0,1810

Dále pro motory č. 1 a 2 jsou zobrazeny frekvenční spektra zrychlení vibrací ve směru axiálním. V porovnání se směrem radiálním pro stejné motory (Graf 22) se spektra výrazně neliší, co se týče projevu zrychlení na jednotlivých frekvencích.

Došlo však k nárůstu amplitudy zrychlení v axiálním směru. Pro první motor (Tabulka 23) je největší amplituda $0,5061 \text{ m/s}^2$ na frekvenci 800 Hz, což je téměř dvojnásobná hodnota oproti hodnotě zrychlení v radiálním směru.

U druhého motoru je na frekvenci 800 Hz ještě výraznější špička zrychlení vibrací $1,3645 \text{ m/s}^2$ (Tabulka 24). I v tomto případě došlo oproti radiálnímu směru k navýšení až na dvojnásobnou hodnotu.



Graf 23: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál A (radiální směr)

Tabulka 25: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 3, kanál A

f [Hz]	30	100	170	300	700	800	900
a [m/s ²]	0,0121	0,0817	0,0495	0,0480	0,0836	0,2197	0,0714

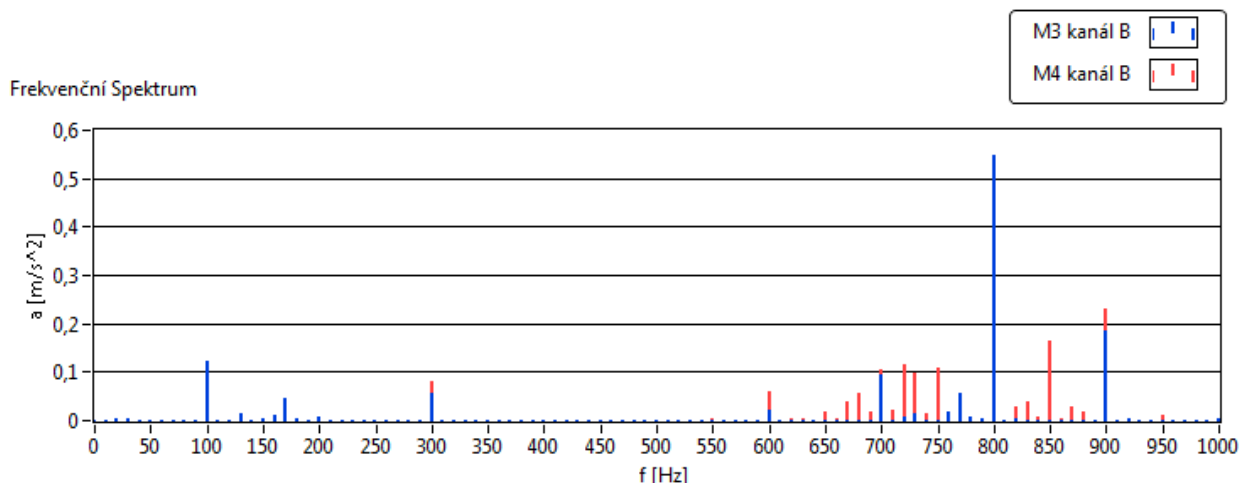
Tabulka 26: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 4, kanál A

f [Hz]	30	100	300	720	750	850	900
a [m/s ²]	0,0262	0,0909	0,0555	0,1093	0,1373	0,2816	0,4625

Při pohledu na další frekvenční spektra pro motory č. 3 a 4 je hned vidět, že se výrazně liší od přechozích spekter. V radiálním směru (Graf 23) dochází k výraznějším vibracím opět na frekvencích okolo 800 Hz a více se projevují u čtvrtého motoru. I zde nejsou amplitudy zrychlení nikterak vysoké a to z již ze známých okolností, protože se jedná o výkonové spektrum. Motory byly při měření nezátížené.

V případě motoru č. 3 jsou v tabulce 25 uvedeny nejvíce projevující se amplitudy zrychlení vibrací na určitých frekvencích. K výrazné špičce dochází na frekvenci 800 Hz, kde je hodnota zrychlení 0,2197 m/s².

Motor č. 4 má výrazné amplitudy na frekvencích od 720 Hz až po 900 Hz. Maximální amplituda zrychlení je 0,4625 m/s², která dominuje na frekvenci 900 Hz. Další hodnoty zrychlení na určitých frekvencích jsou uvedeny v tabulce 26.



Graf 24: DAQ - FFT porovnání frekvenčních spekter zrychlení vibrací, Motor 3,4 - kanál B (axiální směr)

Tabulka 27: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 3, kanál B

f [Hz]	100	170	300	700	800	900
a [m/s ²]	0,1229	0,0441	0,0571	0,0943	0,5469	0,1843

Tabulka 28: DAQ nejvyšší amplitudy zrychlení na daných frekvencích - Motor 4, kanál B

f [Hz]	300	700	720	800	850	900
a [m/s ²]	0,0788	0,1057	0,1142	0,2454	0,1652	0,2295

Poslední porovnávací sérií je frekvenční spektrum ve směru axiálním pro motory č. 3 a 4 (Graf 24). Při prvním pohledu došlo u těchto motorů k nepatrnému nárůstu amplitud zrychlení. U motoru č. 3 jsou největší amplitudy zrychlení na frekvencích 100 Hz, 800 Hz a 900 Hz. Maximální hodnota je 0,5469 m/s².

Amplitudy zrychlení u motoru č. 4 na nižších frekvencích nejsou takřka výrazné. Projevují se vibrace zejména na frekvencích od 700 Hz po 900 Hz. Největších vibrací dosahuje čtvrtý motor na frekvenci 800 Hz se zrychlením 0,2454 m/s².

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo se zaměřit na vibrace v elektrických točivých strojích a jejich následnou diagnostiku pomocí různých metod. Hlavní částí v diagnostikování, vyhodnocování a zpracování zkušebních vibračních signálů byl vytvořen program v LabVIEW. V tomto programovacím prostředí byly zpracovány veškeré naměřené signály vibrací. Měření vibrací probíhalo na typově stejných asynchronních motorech, které se lišily ve výrobní vadě, definované výrobcem. Signály od vibrací na těchto motorech byly získány dvěma způsoby. V prvním případě bylo provedeno měření s průmyslovým zařízením VIBXpert II. Výhodou tohoto přenosného zařízení je jeho jednoduchost. Pro rychle určení efektivní hodnoty zrychlení, rychlosti a výchylky vibrací je ideální jej použít. Dále lze jednoduše a okamžitě sledovat frekvenční spektrum spolu s časovým průběhem vibrací. Druhý způsob měření spočíval v použití laboratorního přístroje DAQ asistentu. Princip měření s tímto přístrojem spočíval v připojení měřicí karty spolu s akcelerometry, snímači zrychlení. V komunikaci s programem LabVIEW byly ihned získány časové průběhy, frekvenční spektra, efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro jednotlivé motory.

Jak bylo zmíněno výše, hlavní částí diplomové práce bylo se zaměřit na použití programu LabVIEW při diagnostikování vibrací v elektrických strojích. Po prvotním seznámení se s programem a odzkoušení základních funkcí, bylo zapotřebí vytvořit strukturovaný program pro načtení naměřených dat a následnou analýzu, jak je uvedeno v kapitole 4.1. Naměřené hodnoty vibrací pomocí VIBXpertu byly importovány do prostředí LabVIEW, kde byla následně provedena frekvenční analýza rychlou Fourierovou transformací, jejímž výsledkem je frekvenční spektrum pro daný průběh vibrací. Dále byly zjištěny efektivní hodnoty a Crest faktory, spolu se zobrazením časového průběhu.

Stejně tak při měření s DAQ asistentem (kapitola 4.2) byl vytvořen program pro čtení měřených dat a následnou analýzu. Program bylo nutné upravit, protože se mění jeho hlavní část. Data nejsou načítány po měření, jako tomu bylo u VIBXpertu, avšak jsou zpracovány v reálném čase. Toho se docílilo použitím měřicí a testovací stanice NI PXIe – 1082 od National Instruments. Tato stanice ve spojení s programem Labview umožňuje okamžité měření vibrací elektrického stroje. Prostřednictvím měřicí karty byly k zařízení připojeny snímače zrychlení (akcelerometry). V LabVIEW byl přidán prvek DAQ asistentu, kde po nastavení základních parametrů jako vzorkovací frekvence a kalibrační data snímačů, bylo možné zahájit měření. Po roztočení motoru stačilo v programu přepnout do režimu RUN, došlo k naměření hodnot vibrací a zobrazení výsledků.

Měřicí část diplomové práce obsahuje data ze dvou dílčích měření. Zpracování těchto hodnot proběhlo ve vytvořených dílčích programech, za účelem vyhodnocení naměřených signálů vibrací. Hodnocení vibrací je kvantifikováno zejména dle normované velikosti efektivní hodnoty a v případě této práce i činitele výkmitu neboli Crest faktoru. K posouzení míry závad na měřených asynchronních strojích slouží i frekvenční spektra.

V případě analyzátoru vibrací VIBXpert II byly získány tyto výsledky. Naměřené efektivní hodnoty zrychlení a rychlosti vibrací jsou uvedeny v tabulce č. 6 a 7 pro motory č. 1, 2, 3, 4. Tyto změřené hodnoty je nutné porovnat mezními efektivními hodnotami kmitání dle normy ČSN EN 60034-14, které jsou uvedeny v tabulce č. 3. Pro motory typu TM 90-4S B3 odpovídá v tabulce první sloupec hodnot pro osovou výšku $h = 90$ mm. Uvažujeme stupeň vibrací A – stroje bez zvláštních požadavků na vibrace a uložení pružné, protože motory při měření nebyly nikterak uchyceny. Potom mezní efektivní hodnota zrychlení je $a = 2 \text{ m/s}^2$ a rychlosti $v = 1,3 \text{ mm/s}^2$.

Z pohledu efektivní hodnoty zrychlení vibrací je vidět z tabulek č. 6 a 7, že mezní efektivní hodnoty byly v některých případech překročeny (žluté hodnoty). Mezní efektivní hodnota zrychlení byla překročena u motoru č. 1 a 3 ve směru axiálním (kanál B). U motoru č. 2 byla překročena ve směru radiálním (kanál A). Naměřená efektivní hodnota zrychlení motoru č. 4 v souladu s mezní hodnotou. V porovnání mezní efektivní hodnoty rychlosti vibrací s naměřenými hodnotami jsou vyhovující motory č. 1, 2, 3. Pouze motor č. 4 vykazoval nevyhovující hodnoty v radiálním i axiálním směru. Z hlediska hodnocení vibrací dle velikosti Crest faktoru, je hodnota značící dobrý (stabilní) stav elektrického stroje v rozmezí $CF = 2\div 4$. Při pohledu do tabulek je zřejmé, že nedošlo k překročení dané hodnoty.

Efektivní hodnoty změřené pomocí DAQ asistentu jsou uvedeny v tabulkách č. 17, 18 opět pro motory č. 1, 2, 3, 4. Prostřednictvím zařízení a programu LabVIEW byly naměřeny pouze hodnoty zrychlení vibrací, jež budeme opět porovnávat s mezními hodnotami zrychlení dané příslušnou normou, která je uvedena výše. Můžeme vidět, že naměřené hodnoty všech motorů jsou v souladu s předepsanou mezní efektivní hodnotou zrychlení $a = 2 \text{ m/s}^2$. Pouze u motoru č. 2 v axiálním směru byla naměřena nepatrně větší. Hodnoty Crest faktorů jsou u motorů č. 1, 2, 3 v pořádku a vyhovují stabilnímu stavu, avšak u motoru č. 4 převyšují hodnotu značící dobrý stav stroje ($CF = 4$).

Hodnocení jednotlivých frekvenčních spekter je obsaženo v dílčím hodnocení bezprostředně u zobrazených frekvenčních spekter. Jak je z těchto hodnocení a grafických zobrazení spekter zřejmé, k nejvyšším amplitudám zrychlení vibrací dochází zejména v rozmezí frekvencí 700 Hz až 900 Hz. Původem těchto vyšších frekvenčních složek jsou definované výrobní vady jednotlivých motorů. Těmi jsou statické a dynamické excentricity, jejichž frekvence působení jsou uvedeny v kapitole 5.1. Ve stejné části práce, byly vypočteny i frekvence běžných závad na ložiscích. Tyto typické defekty ložisek můžeme vyloučit, protože frekvenčním spektru se v obou případech měření (DAQ, VIBXpert) buď neprojevují, nebo mají zanedbatelnou velikost amplitudy zrychlení vibrací oproti zrychlení na frekvencích statické a dynamické excentricity.

Výhody měření průmyslovým analyzátozem VIBXpert II jsou zejména rychlost, přesnost, jednoduchost, efektivita měření a mobilita. Snadnou volbou lze získat frekvenční spektra zrychlení, rychlosti a výchylky vibrací. Určit jejich špičkovou a efektivní hodnotu. Uložit veškeré naměřené průběhy, které lze dále zpracovávat. Oproti tomu DAQ asistent v součinnosti s LabVIEW lze využít k měření a okamžité analýze. V programu si lze předpřipravit různé metody analýz vibrací a následně jen prostřednictvím asistentu proměřit daný motor. Což jako výhodu lze uplatit u menších motorů, které lze jednodušeji přemísťovat, protože při měření a analýze je za potřebí počítač a zdroj elektrické energie. Rozdíly mezi naměřenými hodnotami mohou být způsobeny různou vzorkovací frekvencí, kalibrací akcelerometrů

Využití LabVIEW ve vibrační diagnostice má značnou míru. Dozajista lze vytvořit program pro komplexní hodnocení naměřených vibrací dle předepsaných mezních hodnot efektivní hodnoty, Crest faktoru, vykreslení průběhu činitele výkmitu, zobrazení frekvenčního spektra spolu s časovým signálem a dalších metod analýz vibračních signálů. Takovýto program by byl efektivně využit zejména pro rychlou analýzu vibrací pro zkoušené elektrické stroje. Stačilo by pouze připojit přes snímače zrychlení daný stroj a v LabVIEW by bylo dosaženo výsledků.

LITERATURA

- [1] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN, Praha 2006. 408 stran. ISBN 80-7300-158-6
- [2] BILOŠ J., BILOŠOVÁ A.: *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: Část vibrační diagnostika*. VŠB - TU OSTRAVA, Fakulta strojní. Vydání první. 142 s. Ostrava, 2012.
- [3] JANDA M.: *Měření vibrací v elektrických strojích*. Výuková prezentace. VUT Brno, FEKT. Brno, 2011.
- [4] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J.: *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Nakladatelství VUTINUM A PROMETHEUS. 1287 s. Přeloženo 2001.
- [5] JAKSCH, Ivan. *Technická diagnostika: Měření a diagnostika vibrací* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P8_vibrace%20_ESF.pdf
- [6] GIERAS, Jacek F, Joseph Cho LAI a Chong WANG. *Noise of polyphase electric motors*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2006, 372 p., [4] p. of plates. ISBN 978-082-4723-811.
- [7] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku. 2010, č. 1, s. 1-4. DOI: ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [8] NĚMEČEK P., Elias T.: *Vibrační diagnostika základních závad strojů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>
- [9] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 6. díl -- Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat*. BEN-Technická literatura, 2009, 271 s. ISBN 978-80-7300-2.
- [10] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. 1. BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7 9788073000233.
- [11] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.
- [12] HAVLÍČEK, Josef, Jaroslav VLACH, Martin VLACH a Viktorie VLACHOVÁ. *Začínáme s LabVIEW*. 1. české: BEN - technická literatura, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [13] *Trojfázové a jednofázové asynchronní motory* TM, JMC. EMP Slavkov, 2014. Dostupné také z: <http://www.emp-slavkov.cz/katalogy/motory.pdf>
- [14] ČSN EN 60034-14 ed. 2. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. 20 s. 2004.
- [15] *Windowing: Optimizing FFTs Using Window Functions*. National Instruments [online]. 2011 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/4844/en/>